

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problem Mailbox.**

DERWENT PUBLICATIONS LTD

FRAU ★ Q62 85-141948/24 ★ DE 3343-186-A
Contact free magnetic bearing system for blood pump - includes permanent and electro-magnets in pump stator and rotor, electronic control circuit and position sensor to stabilise rotor

FRAUNHOFER-GESFORD ANGE 29.11.83-DE-343186

S05 X25 (05.06.85) F16c-32/04

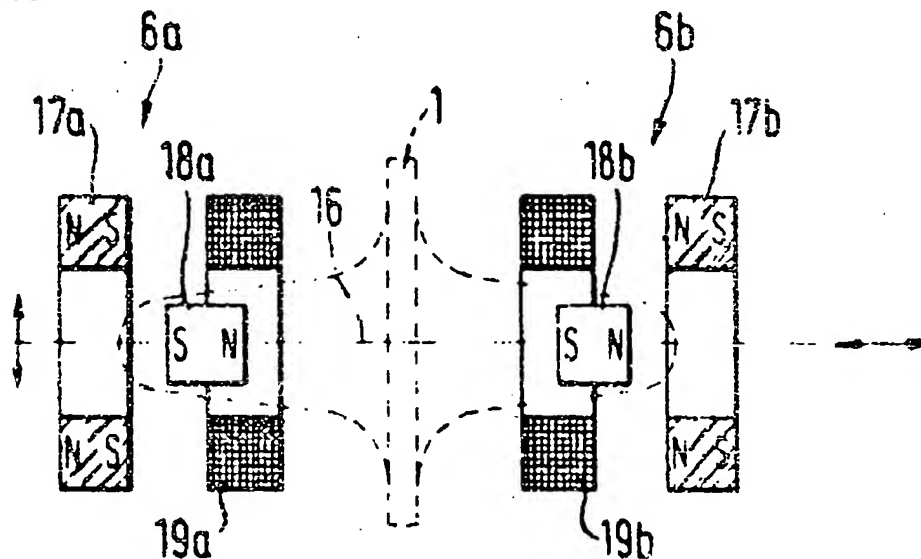
29.11.83 as 343186 (1686AF)

The system includes permanent magnets, with at least one magnet arranged in the rotor and one in the stator. Ring magnets (17a,17b) are mounted in the stator and bar magnets (18a,18b) are mounted in the rotor (1). The magnetic bearing system holds the rotor (1) suspended and contact free in the stator allowing freedom of movement with the exception of axial shift.

Electromagnets (19a,19b) are arranged in the stator to supplement stability of the rotor (1) when necessary, working in conjunction with the permanent magnets (18a,18b,18c,18d). A position sensor with a switch circuit stabilises the rotor position without outside interference to give minimum energy consumption.

USE/ADVANTAGE - For axial or radial centrifugal pumps esp. for blood. Has small energy consumption, and small rise due to contact free bearing enabling blood temp. to be kept below coagulation temp. of 42 deg. cent. (54pp Dwg.No. 2/7)

N83-106870



⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑪ **DE 3343186 A1**

⑤ Int. Cl. 3:
F16C 32/04

⑳ Aktenzeich n: P 33 43 186.8
㉑ Anmeldetag: 29. 11. 83
㉒ Offenlegungstag: 5. 6. 85

DE 3343186 A1

㉓ Anmelder:

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 8000 München, DE

㉔ Erfinder:

Bramm, Gunter; Novak, Pavel, Dr., 8000 München,
DE

⌋ **Magnetische Rotorlagerung**

Es wird eine magnetische Rotorlagerung zum berührungs-
losen Aufhängen eines Rotors, insbesondere des Rotors
einer Axial- oder Radial-Zentrifugalblutpumpe, mit einer den
Rotor in einem Stator, insbesondere einem Gehäuse, auf-
hängenden und lagestabilisierenden Permanent- und Elek-
tromagnetanordnung, sowie mit einer an wenigstens einen
Lagesensor bzw. dessen Lagesensorbetriebsschaltung für
den Rotor angeschlossenen Schaltungsanordnung zur Ver-
fügung gestellt. Der Rotor ist mittels einer Permanentma-
gnetanordnung bis auf einen einzigen geometrischen Ver-
stellfreiheitsgrad stabil berührungslos im Stator aufge-
hängt. Die Rotorposition ist nur innerhalb des mittels der
Permanentmagnetanordnung nicht stabilisierten geometri-
schen Verstellfreiheitsgrads mittels einer im Rotor befindli-
chen und wenigstens einen Permanentmagneten umfassen-
den Permanentmagnetanordnung stabilisiert. Die mit der
Elektromagnetanordnung zusammenwirkende Permanent-
magnetanordnung umfaßt wenigstens einen Permanentma-
gneten der zum Aufhängen des Rotors vorgesehenen Perma-
nentmagnetanordnung und besteht insbesondere aus
den im Rotor angebrachten Permanentmagneten dieser
Permanentmagnetanordnung. Die Schaltungsanordnung ist
eine die Rotorposition bei Nichteinwirkung äußerer Kräfte in
einer Lage minimalen Energiebedarfs der Elektromagnetan-
ordnung stabilisierende Regelschaltung.

KRAUS & WEISERT

PATENTANWÄLTE

UND ZUGELASSENE VERTRETER VOR DEM EUROPÄISCHEN PATENTAMT

DR. WALTER KRAUS DIPLOM-CHEMIKER · DR.-ING. ANNEKÄTE WEISERT DIPL.-ING. FACHRICHTUNG CHEMIE
IRMGARDSTRASSE 15 · D-8000 MÜNCHEN 71 · TELEFON 089/797077-797078 · TELEX 05-212166 kpat d
TELEGRAMM KRAUSPATENT

3343186

FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG
DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG e.V.

4177 JS/ei

8000 München 19

Magnetische Rotorlagerung

P A T E N T A N S P R Ü C H E

1. Magnetische Rotorlagerung zum berührungslosen Aufhängen eines Rotors, insbesondere des Rotors einer Axial- oder Radial-Zentrifugalblutpumpe, mit einer den Rotor in einem Stator, insbesondere einem Gehäuse, aufhängenden und lagestabilisierenden Permanent- und Elektromagnetanordnung, sowie mit einer an wenigstens einen Lagesensor bzw. dessen Lagesensorbetriebsschaltung für den Rotor angeschlossenen Schaltungsanordnung, dadurch gekennzeichnet, daß
- 10 (a) der Rotor (1) mittels einer Permanentmagnetanordnung (17a, 17b, 18a, 18b), welche wenigstens einen im Rotor (1) und wenigstens einen im Stator (5) angebrachten Permanentmagneten (18a, 18b, 18c, 18d bzw. 17a, 17b) umfaßt, bis auf einen einzigen geometrischen Verstellfreiheitsgrad stabil berührungslos im Stator (5) aufgehängt ist;
- 15

- (b) die Rotorposition nur innerhalb des mittels der Permanentmagnetanordnung (17a, 17b, 18a, 18b, 18c, 18d) nicht stabilisierten geometrischen Verstellfreiheitsgrads mittels einer im Stator (5) vorgesehenen, wenigstens einen Elektromagneten (19a, 19b) umfassenden Elektromagnetanordnung und einer damit zusammenwirkenden, im Rotor (1) befindlichen und wenigstens einen Permanentmagneten (18a, 18b, 18c, 18d) umfassenden Permanentmagnetanordnung stabilisiert ist;
- (c) die mit der Elektromagnetanordnung zusammenwirkende Permanentmagnetanordnung wenigstens einen Permanentmagneten (18a, 18b, 18c, 18d) der zum Aufhängen des Rotors (1) vorgesehenen Permanentmagnetanordnung umfaßt, insbesondere aus den im Rotor (1) angebrachten Permanentmagneten (18a, 18b, 18c, 18d) dieser Permanentmagnetanordnung besteht, und
- (d) die Schaltungsanordnung eine die Rotorposition bei Nichteinwirkung äußerer Kräfte in einer Lage minimalen Energiebedarfs der Elektromagnetanordnung stabilisierende Regelschaltung (7) ist.
2. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß
- (a) die den Rotor (1) aufhängende Permanentmagnetanordnung einen konzentrisch zur Rotorachse (16) angeordneten, in Axialrichtung des Rotors (1) magnetisierten ortsfesten Ringpermanentmagneten (17a, 17b), und einen axial versetzt bezüglich des Ringpermanentmagneten (17a, 17b), jedoch konzentrisch zu demselben auf der Rotorachse (16) angeordneten und in Axialrichtung

- des Rotors (1) magnetisierten Stabpermanentmagneten (18a, 18b) oder Ringpermanentmagneten (18c, 18d) umfaßt, wobei gleichnamige Magnetpole (S, N) des Ringpermanentmagneten (17a, 17b) des Stators (2) und des Stabpermanentmagneten (18a, 18b) oder des Ringpermanentmagneten (18c, 18d) des Rotors (5) einander zugewandt sind;
- (b) die Elektromagnetanordnung einen axialen Elektromagneten (19a, 19b) aufweist, innerhalb dessen der Stabpermanentmagnet (18a, 18b) oder der Ringpermanentmagnet (18c, 18d) des Rotors (1) angeordnet ist; und
- (c) die Schaltungsanordnung eine mit ihrem Istwert-Eingang (22) an den die axiale Lage des Rotors ermittelnden Lagesensor (8a, 8b) bzw. dessen Lagesensorbetriebsschaltung (9) angeschlossene Regelschaltung (7) ist.
3. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Regelschaltung (7) einen stromproportional regelnden Endverstärker (32) aufweist.
4. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Regelschaltung (7) eine deren Sollwert beim langzeitigen Einwirken wesentlicher äußerer Kräfte direkt oder durch Veränderung des Istwerts des Lagesensors (8a, 8b) indirekt verschiebenden, den Energieverbrauch der magnetischen Rotorlagerung vermindern, vorzugsweise minimalisierenden, übergeordneten Regler (33) aufweist.

3343186

5. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß der übergeordnete Regler (33) folgendes umfaßt:

- 5 (a) eine das Vorhandensein äußerer Kräfte ermittelnde Detektionseinrichtung (44);
- (b) eine den Rotor (1) aus seiner stabilisierten Mittenlage in eine außermittige Stabilisierungslage verstellende Verstelleinrichtung (45); und
- 10 (c) eine den Energiebedarf der Rotorlagerung in der stabilisierten Mittenlage mit deren Energiebedarf in der außermittigen Stabilisierungslage oder den Energiebedarf in zwei verschiedenen außermittigen Stabilisierungslagen vergleichenden Vergleichseinrichtung (46).
- 15

6. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Detektionseinrichtung (44) eine Strommeßeinrichtung zum Messen des durch die Elektromagnetanordnung (19a, 19b) fließenden elektrischen Stromes ist oder eine Strommeßeinrichtung zum Messen des gesamten elektrischen Stromes, welcher durch den Lagesensor (8a, 8b), die Regelschaltung (7) und die Elektromagnetanordnung (19a, 19b) umfassenden Regelkreis fließt.

20

25

7. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Verstelleinrichtung (45) eine Lagesensor-Sollwertveränderungseinrichtung ist.

30

8. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 5, dadurch
g e k e n n z e i c h n e t , daß die Vergleichseinrich-
tung (46) eine Strommeßeinrichtung zum Messen des durch
die Elektromagnetanordnung (19a,19b) oder durch den gesam-
5 ten Regelkreis fließenden elektrischen Stromes und eine
die Strommeßwerte speichernde und vergleichende Sample-
und Holdschaltung umfaßt.
9. Magnetische Rotorlagerung nach einem der Ansprüche
10 1 bis 8, dadurch g e k e n n z e i c h n e t , daß der
Lagesensor wenigstens eine von der Rotorwelle betätigte
Impulsstrahlungsschranke (8a,8b) mit einem impulsgesteuer-
ten Strahlungssendeelement (24a,24b) und einem Strahlungs-
empfangselement (29a,29b) umfaßt.
- 15 10. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 9, dadurch
g e k e n n z e i c h n e t , daß zwei Lagesensoren (8a,
8b) und eine daran angekoppelte Lagesensorbetriebsschal-
tung (9) vorgesehen sind und folgendes umfassen:
- 20 (a) zwei Impulsstrahlungsschranken (8a,8b), von denen je
eine mit je einem axialen Ende (23a,23b) der Rotorwel-
le zusammenwirkt;
- 25 (b) eine die Ausgangssignale der Strahlungsempfangselemen-
te (29a,29b) der beiden Impulsstrahlungsschranken (8a,
8b) substrahierende Subtraktionseinrichtung (38);
- 30 (c) eine die Ausgangssignale der Subtraktionseinrichtung
(38) integrierende Integrationseinrichtung (39);

- (d) eine an den Ausgang der Integrationseinrichtung (39) angeschlossene Sample- und Holdschaltung (40); und
- (e) eine Ablaufsteuereinrichtung (42) zur Steuerung des Schließ- und Öffnungstakts und der Schließ- und Öffnungszeiten eines ersten, zweiten und dritten Schalters (S_1 , S_2 , S_3), von denen der erste Schalter (S_1) zwischen dem Ausgang der Subtraktionseinrichtung (38) und dem Eingang der Integrationseinrichtung (39) vorgesehen ist, während der zweite Schalter (S_2) ein die Rückstellung der Integrationseinrichtung (39) bewirkender Schalter ist und der dritte Schalter (S_3) zwischen dem Ausgang der Integrationseinrichtung (39) und dem Eingang der Sample- und Holdschaltung (40) angeordnet ist, wobei die Ablaufsteuereinrichtung (42) die Schließzeiten der drei Schalter (S_1 , S_2 , S_3) derart steuert, daß der erste Schalter (S_1) immer dann angeschlossen ist, wenn die Strahlungssendeelemente (24a, 24b) senden, während das Schließen des dritten Schalters (S_3) jeweils nach Integration einer vorbestimmten Anzahl von Ausgangssignalen der Subtraktionseinrichtung (38) erfolgt und der zweite Schalter (S_2) nach Öffnen des dritten Schalters (S_3) geschlossen wird.
- 25 11. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Impulsstrahlungsschranken (8a, 8b) Infrarotlicht oder Ultraschallschranken sind.
- 30 12. Magnetische Rotorlagerung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß als Antrieb des Rotors (1) ein Asynchronmotor (1, 10a, 10b, 10, 10c) vorgesehen ist, der an einen Oszillator (50) als Betriebsspannungsquelle angeschlossen ist, dessen Frequenz (f) und
- 35 Ausgangsspannungsamplitude (A) last- und drehzahlabhängig derart veränderbar sind, daß das vom Asynchronmotor (1, 10a,

10b, 10, 10c) abgegebene Drehmoment (M) bei der jeweiligen Drehzahl (N) des Asynchronmotors (1, 10a, 10b, 10, 10c) mit dem Lastmoment korreliert, insbesondere das jeweilige Lastmoment des Rotors (1) auf der Motorkennlinie (I, II) des Asynchronmotors (1, 10a, 10b, 10, 10c) wenig unterhalb des Kippmoments (M_1, M_2) und oberhalb der Kippdrehzahl (N_1, N_2) liegt.

13. Magnetische Rotorlagerung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß bei Anordnung des Rotors (1) als Förderorgan in einer Blutpumpe, insbesondere einer Zentrifugalblutpumpe, (2) eine Antriebsleistungssteuereinrichtung vorgesehen ist, die folgendes umfaßt:

- 15 (a) einen Drucksensor (12) auf der Saugseite der Blutpumpe (2);
- (b) einen mit seinem Eingang an den Drucksensor (12) angeschlossenen und einer vorbestimmten Eingangsgröße eine bestimmte Ausgangsgröße zuordnenden und abgebenden Charakteristikspeicher (56); und
- (c) eine die tatsächliche Blutpumpenleistung entsprechend der Ausgangsgröße des Charakteristikspeichers (56) steuernde Leistungssteuereinrichtung, vorzugsweise einen an einen die Blutpumpe (2) antreibenden Asynchronmotor als Betriebsspannungsquelle angeschlossenen und in seiner Frequenz und Ausgangsspannung last- und drehzahlabhängig veränderbaren Oszillator (50).

30

14. Magnetische Rotorlagerung nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß ein die Betriebsspannungsamplitude (A) des Asynchronmotors in Abhängigkeit von der Frequenz (f) des Oszillators (50) steuernder weiterer Charakteristikspeicher (57) vorgesehen ist.

35

B E S C H R E I B U N G

Die Erfindung betrifft eine magnetische Rotorlagerung zum berührungslosen Aufhängen eines Rotors, insbesondere des Rotors einer Axial- oder Radial-Zentrifugalblutpumpe, mit einer den Rotor in einem Stator, insbesondere einem Gehäuse, aufhängenden und lagestabilisierenden Permanent- und Elektromagnetanordnung, sowie mit einer an wenigstens einen Lagesensor für den Rotor angeschlossenen Schaltungsanordnung zum Einstellen des Magnetfelds der Elektromagnetanordnung.

Obwohl die magnetische Rotorlagerung nach der Erfindung für den Rotor einer Axial- oder Radial-Zentrifugalblutpumpe eines künstlichen Herzens entwickelt worden ist, ist ihre Anwendung keineswegs auf derartige Zentrifugalblutpumpen beschränkt, sondern sie ist darüber hinaus für die verschiedensten Rotoren geeignet, die mittels einer berührungslosen magnetischen Aufhängung gelagert werden können. So ist die magnetische Rotorlagerung einschließlich der zugehörigen, an einen oder mehrere Lagesensoren angeschlossenen Schaltungsanordnung zum Einstellen der Magnetkraft der darin vorgesehenen Elektromagnetanordnung auch für die Kreiselkompaßlagerung und den Kreiselkompaßantrieb, beispielsweise für deren Verwendung in der Raumfahrttechnik, beim Flugbetrieb und in U-Booten o.dgl., sowie für Kreiselrichtungsstabilisatoren, die zum Beispiel in raketengetriebenen Flugkörpern vorgesehen werden und auch für Zeigerinstrumente o.dgl. geeignet.

Auch hinsichtlich ihrer Anwendung in Pumpen ist die mit der Erfindung zur Verfügung gestellte magnetische Rotorlagerung nicht auf Axial- oder Radial-Zentrifugalblutpumpen beschränkt, sondern sie läßt sich auch bei anderen Blutpumpen anwenden.

die einen Rotor besitzen, der magnetisch aufgehängt werden kann. Weiterhin kann die magnetische Rotorlagerung auch bei anderen Rotorpumpen angewandt werden; zum Beispiel kann sie mit besonderem Vorteil in Rotorpumpen für radioaktive Flüssigkeiten verwendet werden, weil solche Rotorpumpen, wenn sie mit einer magnetischen Rotorlagerung nach der Erfindung versehen sind, reibungs- und damit wartungsfrei sind, da sie keine mechanischen Lager, keine Ventile, keine Dichtungen etc. benötigen, die einem Verschleiß unterliegen.

Magnetische Rotorlagerungen zum berührungslosen Aufhängen eines Rotors sind an sich in verschiedenen Ausführungsformen bekannt. So ist aus der US-Patentschrift 3 938 913 eine Strömungseinrichtung zum Pumpen und/oder Messen der Strömung von aggressiven, radioaktiven oder besonders reinen Strömungsmitteln bekannt, in der ein Rotor berührungslos magnetisch in einem Gehäuse aufgehängt ist, wobei zur Aufhängung des Rotors Elektromagnete in dem Gehäuse vorgesehen sind, die mit magnetischem Material, das gegenüber den Elektromagneten im Rotor angebracht ist, jeweils einen magnetischen Kreis bilden. In diesen magnetischen Kreisen werden nur anziehende Kräfte angewandt, durch welche der Rotor innerhalb des Gehäuses in der Schwebelage gehalten wird.

Die Anwendung von ausschließlich anziehenden Kräften, die mit Elektromagneten erzeugt werden, hat jedoch erhebliche Nachteile:

- (a) Die Stabilität der magnetischen Lagerung, d.h. die Stabilität der Aufrechterhaltung der richtigen Schwebelage des Rotors, bei welcher der Rotor in allen Radialrichtungen in einem etwa gleich großen Abstand von der Gehäuseinnenwand angeordnet ist, ist gegenüber eigenregten und fremderregten Schwingungen sehr unbefriedigend. Eine derartige magnetische Rotorlagerung

- neigt wegen des verzögerten Magnetfeldaufbaus verhältnismäßig leicht zu Schwingungen. Dieser verzögerte Magnetfeldaufbau resultiert aus den relativ großen Induktivitäten, die erforderlich sind, um das gesamte Magnetfeld jeweils durch elektrische Ströme aufzubauen, und wegen der hohen Permeabilität von Eisen (μ relativ bis zu 10 000) ergeben sich hohe absolute Induktivitäten, die einen verzögerten Stromanstieg zur Folge haben.
- 5
- 10 (b) Der Energieverbrauch einer solchen Elektromagnete aufweisenden magnetischen Rotorlagerung ist sehr hoch, und gleichzeitig ist der Wirkungsgrad verhältnismäßig schlecht, so daß in hohem Maße unerwünschte Wärmeenergie entwickelt wird, die nicht nur nutzlos vergeudet wird und deren Ab-
- 15 führung nicht nur schwierig ist, sondern die darüber hinaus bei Blutpumpen äußerst gefährlich ist, da das Blut-eiweiß bei 42°C koaguliert.
- (c) Die spezifischen Kräfte sind relativ gering, ebenso die
- 20 relativen Spitzenkräfte, weil Eisen eine hohe Dichte hat und Felder wesentlich über 10 Kilogaß zu Sättigungerscheinungen führen, wobei μ relativ gegen 1 geht.
- 25 Weiterhin ist aus der europäischen Offenlegungsschrift 0 060 569 der europäischen Patentanmeldung 82 102 188.8 eine u.a. vom Erfinder der vorliegenden magnetischen Rotor-lagerung früher entwickelte magnetische Rotorlagerung zum berührungslosen Aufhängen eines Rotors einer Zentrifugal-
- 30 blutpumpe bekannt, in welcher zur Aufhängung des Rotors eine kombinierte Elektromagnet- und Permanentmagnet-Anordnung vorgesehen ist, die aus Elektromagneten besteht, welche in dem das Gehäuse der Zentrifugalblutpumpe bildenden Stator vorgesehen sind, und aus Permanentmagneten, welche
- 35

gegenüber den Elektromagneten im Rotor angebracht sind, so daß sie mit den Elektromagneten zusammenwirken.

Diese kombinierte Elektromagnet- und Permanentmagnet-Anordnung hat im Prinzip die gleichen Nachteile, wie sie vorstehend in Verbindung mit der magnetischen Rotorlagerung nach der US-Patentschrift 3 938 913 erwähnt sind. Denn die ausschließliche Anwendung von Elektromagneten im Stator führt zu einem verhältnismäßig hohen Energieverbrauch und damit zu starker Wärmeentwicklung, und außerdem ergibt sich eine relativ unbefriedigende Stabilität infolge des den Elektromagneten inhärenten verzögerten Feldaufbaus.

Mit der Erfindung soll demgegenüber eine magnetische Rotorlagerung der eingangs genannten Art zur Verfügung gestellt werden, die insbesondere die nachfolgenden beiden Forderungen erfüllt:

(1) Die magnetische Rotorlagerung soll einen höchstmöglichen elektromechanischen Wirkungsgrad haben, damit der in Wärme umgewandelte Anteil der für die magnetische Aufhängung und Lagestabilisierung des Rotors aufgewandten Energie prozentual möglichst klein ist und damit die Betriebstemperatur auf möglichst niedrige Werte, insbesondere auf Werte beschränkt bleibt, die unterhalb der Temperatur liegen, bei welcher eine Koagulation des Bluteiweißes einsetzt.

(2) Der absolute Energiebedarf der magnetischen Rotorlagerung soll so klein wie möglich sein, damit der absolute Energiebetrag, der aufgrund der magnetischen Aufhängung und Stabilisierung des Rotors in Wärmeenergie umgewandelt wird, möglichst gering ist und damit außerdem jeder Baustein der gesamten magnetischen Rotorlagerung möglichst klein wird, was besonders für die Anwendung der magnetischen Rotorlagerung in einer Zentrifu-

3343186

galblutpumpe, welche implantiert werden soll, wichtig ist, insbesondere im Hinblick darauf, daß schon eine geringe Verminderung des Energiebedarfs der Zentrifugalblutpumpe selbst eine große Verminderung des Gewichts, des Volumens und des Leistungsbedarfs der gesamten zu implantierenden Zentrifugalblutpumpenanordnung zur Folge hat, welche außer der Zentrifugalblutpumpe eine Regelschaltung und beispielsweise einen Energiewandler oder -speicher sowie eine induktive Energieeinkopplungsvorrichtung zum Einkoppeln von Energie in die implantierte Zentrifugalblutpumpenanordnung umfaßt.

Diese Ziele werden mit einer magnetischen Rotorlagerung der eingangs genannten Art erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß

15

(a) der Rotor mittels einer Permanentmagnetanordnung, welche wenigstens einen im Rotor und wenigstens einen im Stator angebrachten Permanentmagneten umfaßt, bis auf einen einzigen geometrischen Verstellfreiheitsgrad stabil berührungslos im Stator aufgehängt ist;

20

(b) die Rotorposition nur innerhalb des mittels der Permanentmagnetanordnung nichtstabilisierten geometrischen Verstellfreiheitsgrads mittels einer im Stator vorgesehenen, wenigstens einen Elektromagneten umfassenden Elektromagnetanordnung und einer damit zusammenwirkenden, im Rotor befindlichen und wenigstens einen Permanentmagneten umfassenden Permanentmagnetanordnung stabilisiert ist;

25

30

(c) die mit der Elektromagnetanordnung zusammenwirkende Permanentmagnetanordnung wenigstens einen Permanentmagneten der zum Aufhängen des Rotors vorgesehenen Permanentmagnetanordnung umfaßt, insbesondere aus den im Rotor angebrachten Permanentmagneten dieser Permanentmagnetanordnung besteht; und

35

(d) die Schaltungsanordnung eine die Rotorposition bei
Wirkung äußerer Kräfte in einer Lage minimalen
Energiebedarfs der Elektromagnetanordnung stabilisie-
renden Regelschaltung ist.

5

Die Funktion gemäß (d) wird von einem Regelkreis mit festem
Sollwert erfüllt.

10 Diese magnetische Rotorlagerung nach der Erfindung hat
einen höchstmöglichen elektromechanischen Wirkungsgrad, da
nur der geringstmögliche Anteil der zum Aufhängen und Sta-
bilisieren des Rotors benötigten Magnetkräfte elektromag-
netisch erzeugt wird, während der bei weitem größte An-
15 teil der erforderlichen Magnetkräfte mittels Permanentmag-
neten aufgebracht wird. Es sei in diesem Zusammenhang dar-
auf hingewiesen, daß eine stabile Aufhängung des Rotors
mittels Permanentmagneten allein gemäß dem Earnshaw-Theorem
nicht möglich ist, wonach jedes nur mittels Permanentmag-
20 neten im Raum (3 Dimensionen) im Gleichgewicht gehaltene
mechanische System instabil ist. Außerdem ist der absolute
Energiebedarf der magnetischen Rotorlagerung nach der Er-
findung so klein wie möglich, weil die Regelschaltung die
Rotorposition in einer Lage stabilisiert, in welcher der
absolute Energiebedarf der Elektromagnetanordnung ohne
25 äußere Kräfte minimalisiert ist, während zur Minimalisie-
rung bei Einwirkung äußerer Kräfte ein weiter unten ange-
gebener übergeordneter Regler vorgesehen sein kann.

Die erfindungsgemäße magnetische Rotorlagerung ist daher
30 mit besonderem Vorteil für alle die Fälle geeignet, in de-
nen der Energiebedarf einer solchen magnetischen Rotorla-
gerung absolut und relativ gering sein sollte und außerdem
die Temperaturerhöhung, welche die magnetische Rotorlage-
rung infolge der entstehenden Wärme erfährt, möglichst
35 klein sein sollte. Infolgedessen ist die magnetische Ro-
torlagerung nach der Erfindung besonders vorteilhaft bei

pumpen, anwendbar, vor allem in den Fällen, in denen derartige Blutpumpen implantiert werden sollen. Die verhältnismäßig geringe Wärmeentwicklung ermöglicht es, mit Sicherheit unterhalb der Temperatur von 42°C zu bleiben, bei welcher das Bluteiweiß zu koagulieren beginnt und die daher
5 äußerst gefährlich für den menschlichen Blutkreislauf ist.

Eine besonders bevorzugte Ausführungsform der vorstehend angegebenen magnetischen Rotorlagerung nach der Erfindung
10 zeichnet sich dadurch aus, daß

(1) die den Rotor aufhängende Permanentmagnetanordnung einen konzentrisch zur Rotorachse angeordneten, in Axialrichtung des Rotors magnetisierten ortsfesten
15 Ringpermanentmagneten und einen axial versetzt bezüglich des Ringpermanentmagneten, jedoch konzentrisch zu demselben auf der Rotorachse angeordneten und in Axialrichtung des Rotors magnetisierten Stab- oder Ringpermanentmagneten umfaßt, wobei gleichnamige Magnetpole
20 des Ringpermanentmagneten des Stators und des Stab- oder Ringpermanentmagneten des Rotors einander zugewandt sind;

(2) die Elektromagnetanordnung einen axialen Elektromagneten aufweist, innerhalb dessen der Stab- oder Ringpermanentmagnet des Rotors angeordnet ist; und
25

(3) die Schaltungsanordnung eine mit ihrem Istwert-Eingang an den die axiale Lage des Rotors ermittelnden Lagesensor angeschlossene Regelschaltung ist.
30

Durch diese erfindungsgemäße Permanentmagnetkonfiguration wird erreicht, daß bei gegebener Größe des Magnetmaterials bzw. der Magnetanordnung, insbesondere bei gegebener Menge,
35 bei gegebenem Volumen und bei gegebenem Gewicht des Magnetmaterials bzw. der Magnetanordnung, maximale Zentrierungs-

Die erfindungsgemäße Permanentmagnetanordnung ist vorzugsweise wie folgt aufgebaut:

- 5 (1) Bei gegebenem Querschnitt der Permanentmagneten soll deren Länge so gewählt sein, daß sich der maximale äußere Streufluß ausbilden kann. Dazu muß die Länge des Permanentmagneten so gewählt werden, daß die vorhandene magnetische Spannung gerade ausreicht, um den Streufluß durch den magnetischen Widerstand im Streufeldbereich bzw. -volumen zu treiben.
- 15 (2) Als Permanentmagnetmaterial werden vorzugsweise Seltene Erden-Magnete, insbesondere Cobalt-Samarium-Magnete verwendet. Dieses Material wird in geringstem Maße unter dem Einfluß eines magnetischen Fremdfeldes geschwächt oder entmagnetisiert. Außerdem wird eine hohe magnetische Spannung bei geringster Magnetlänge erreicht. Schließlich ist die spezifische magnetische Energie des Materials bezogen auf das Gewicht, die größte aller Magnetmaterialien. Endlich ist die Homogenität der Magnetisierung des Materials relativ gut.
- 20 (3) Der äußere Durchmesser des Stab- oder Ringpermanentmagneten des Rotors muß in der Größenordnung des inneren Durchmessers des Ringpermanentmagneten des Stators liegen und etwas kleiner als dieser sein. Dadurch wird erreicht, daß z.B. bei einer radialen Verschiebung des Rotorpermanentmagneten gegenüber dem Statorpermanentmagneten eine, bezogen auf die Längeneinheit der Verschiebung, maximale Änderung der Gesamtmagnetfeldenergie der Permanentmagnetanordnung stattfindet.
- 25 (4) Es wird nur extrem homogenes Magnetmaterial verwendet, weil sonst die Drehung des Rotors exzentrisch erfolgt, da die Symmetrieachse des Magnetfeldes andernfalls nicht mit der geometrischen Achse des Magneten über-
- 30
- 35

- Bei der erfindungsgemäßen Permentmagnetanordnung bedarf lediglich der axiale Freiheitsgrad einer Stabilisierung, um die gesamte magnetische Rotorlagerung stabil zu machen, und diese Stabilisierung erfolgt durch die erwähnte, einen
- 5 axialen Elektromagneten aufweisende Elektromagnetanordnung. Wesentliches Merkmal des erfindungsgemäß ausgebildeten gemischt permanentmagnetischen-elektromagnetischen Aufbaus ist die hierbei auftretende Wechselwirkung zwischen Permanentmagnetfeld und Elektromagnetfeld, wobei
- 10 der axiale Freiheitsgrad dadurch mittels des Elektromagneten stabil gemacht wird, daß die Feldstärke dieses Elektromagneten durch einen Regelkreis geregelt wird, der eine die Position der Rotorachse in Axialrichtung ermittelnde Lagesensoreinrichtung umfaßt, durch welche ein
- 15 die Ist-Position der Rotorachse in Axialrichtung angegebendes Signal erzeugt wird, das im Regelkreis mit einem die Soll-Position der Rotorachse in Axialrichtung angegebenden Sollwert verglichen wird, woraufhin die Regelschaltung dieses Regelkreises die elektrische Speisung des Elektromagneten so einregelt, daß die axiale Position der
- 20 Rotorachse in die Soll-Position gebracht und in dieser Soll-Position gehalten wird.
- 25 Eine besonders schnelle Rückstellung der Rotorachse in die Soll-Position dann, wenn die Rotorachse durch irgendwelche Kräfte aus dieser Soll-Position verschoben wird, wird dadurch erreicht, daß in Weiterbildung der Erfindung die Regelschaltung einen stromproportional regelnden Endverstärker aufweist. Dadurch kann der Strom in der Erregungsspule
- 30 des Elektromagneten innerhalb kürzester Zeit auf einen bestimmten Stromwert, der zur Rückführung der Rotorachse in deren axiale Soll-Position erforderlich ist, eingestellt werden. Eine Verzögerung des Feldaufbaus durch die Induktivität des Elektromagneten kann hierdurch eliminiert werden.
- 35

Die vorstehend angegebene Regelung mit fester axialer Soll-Position des Rotors ist hinsichtlich des Energieverbrauchs zwar für kurzzeitige, auf den Rotor einwirkende äußere Verstellkräfte optimal, da derartige kurzzeitige Kräfte definitionsgemäß nach verhältnismäßig sehr kurzer Zeit, nämlich nach einigen tausendstel, hundertstel oder zehntel Sekunden, wieder verschwinden. Wenn jedoch äußere axiale Verstellkräfte auf die Rotorachse einwirken, die langfristig, d.h. ab einigen zehntel Sekunden bis einige Stunden lang, wirken, dann kann sich ein wesentlich erhöhter Energieverbrauch für die Stabilisierung der Rotorachse in der vorerwähnten Soll-Position ergeben. Um diesen erhöhten Energieverbrauch zu vermindern, ist eine besonders bevorzugte Ausführungsform der magnetischen Rotorlagerung erfindungsgemäß derart ausgebildet, daß die Regelschaltung eine deren Sollwert beim langzeitigen Einwirken wesentlicher äußerer Kräfte direkt oder durch Veränderung des Istwerts des Lage-sensors indirekt verschiebenden, den Energieverbrauch der magnetischen Rotorlagerung vermindern, vorzugsweise minimalisierenden, übergeordneten Regler aufweist. Untersuchungen an praktischen Ausführungen der erfindungsgemäßen magnetischen Rotorlagerung haben gezeigt, daß der Leistungsbedarf dieser magnetischen Rotorlagerung bei Nichtvorhandensein wesentlicher äußerer Kräfte beispielsweise etwa 0,1 Watt für die Lageregelung der Rotorachse beträgt, und daß dieser Leistungsbedarf beim Einwirken wesentlicher äußerer Kräfte bis auf beispielsweise 10 bis 15 Watt ansteigen kann, also auf den 100- bis 150fachen Betrag, wenn der vorerwähnte übergeordnete Regler nicht vorgesehen ist. Wesentliche äußere Kräfte sind insbesondere einseitig wirkende Beschleunigungskräfte, wie sie zum Beispiel in Kraftfahrzeug, Eisenbahn, Flugzeug o.dgl. beim Anfahren und Abbremsen auftreten, sowie die Erdbeschleunigung, sofern sie bezüglich der Axialrichtung des Rotors stark unsymmetrisch wird, was beispielsweise geschehen kann, wenn sich ein Pa-

tient, dem ein künstliches Herz mit einem Rotor implantiert ist, welcher mittels der magnetischen Rotorlagerung nach der Erfindung gelagert ist, beim Schlafen auf die Seite legt o.dgl. Wenn man bedenkt, daß bei einem solchen im-

5 plantierten künstlichen Herzen die benötigte Leistung induktiv in den Körper des Menschen eingekoppelt werden muß, dann ist es ganz wesentlich, daß die zur Lagestabilisierung des Rotors benötigte Leistung anstatt, wie oben erwähnt, beispielsweise 10 bis 15 Watt nur etwa 0,1 Watt be-

10 trägt.

Im einzelnen umfaßt der übergeordnete Regler vorzugsweise folgendes:

- 15 (a) eine das Vorhandensein äußerer Kräfte ermittelnde Detektionseinrichtung;
- (b) eine den Rotor aus seiner stabilisierten Mittenlage in eine außermittige Stabilisierungslage verstellende Ver-
- 20 stelleinrichtung; und
- (c) eine den Energiebedarf der Rotorlagerung in der stabilisierten Mittenlage mit deren Energiebedarf in der außermittigen Stabilisierungslage vergleichende Ver-
- 25 gleichseinrichtung.

Ein in dieser Art ausgebauter übergeordneter Regler arbeitet daher, wenn die Detektionseinrichtung wesentliche äußere Kräfte ermittelt, in der Weise, daß die Detektionsein-

30 richtung die Verstelleinrichtung veranlaßt, den Rotor aus der bisherigen stabilisierten Mittenlage ein Stück weit in eine außermittige Stabilisierungslage zu verstellen, so daß permanentmagnetische Kräfte der Lagermagneten, die bei einer unsymmetrischen Lage des Rotors auftreten, den

35 äußeren Kräften entgegenwirken.

- Daraufhin erfolgt mittels der Vergleichseinrichtung ein Vergleich des vorherigen Energiebedarfs mit dem neuen Energiebedarf der magnetischen Rotorlagerung, und je nachdem, ob der neue Energiebedarf höher oder geringer als der vorhergehende Energiebedarf ist, wird die Verstelleinrichtung veranlaßt, den Rotor in einem nächsten Schritt erneut im Sinne einer Verminderung des Energiebedarfs der magnetischen Rotorlagerung zu verstellen, und dieses schrittweise oder kontinuierliche Verstellen erfolgt bevorzugt so lange, bis eine neue Stabilisierungslage der Rotorachse erreicht ist, bei welcher die magnetische Rotorlagerung bei der jeweiligen wesentlichen äußeren Kraft einen minimalen Energiebedarf hat.
- 15 Durch entsprechende Ansprechverzögerung kann erreicht werden, daß der übergeordnete Regler auf kurzzeitige äußere Kräfte, beispielsweise solche, die nur Bruchteile von Sekunden dauern, nicht anspricht.
- 20 Obwohl Detektionseinrichtungen der verschiedensten Art für einen solchen übergeordneten Regler geeignet sind, ist es zu bevorzugen, als Detektionseinrichtung eine Strommeßeinrichtung zum Messen des durch die Elektromagnetanordnung fließenden elektrischen Stromes zu verwenden, oder eine
- 25 Strommeßeinrichtung zum Messen des gesamten elektrischen Stromes, welcher durch den den Lagesensor bzw. die Lagesensoren, die Regelschaltung und die Elektromagnetanordnung umfassenden Regelkreis fließt.
- 30 Eine bevorzugte Ausführungsform der Verstelleinrichtung ist eine Lagesensor-Sollwertveränderungseinrichtung, wobei dieser Sollwert, welcher der axialen Sollposition der Rotorachse entspricht, entweder direkt verändert werden kann, indem der in den Regelkreis eingegebene Sollwert entsprechend verändert wird, oder indirekt, indem der in die Re-
- 35

gelschaltung eingegebene Sollwert konstant gehalten, jedoch zu dem vom jeweiligen Lagesensor abgegebenen Istwert eine zusätzliche Größe addiert oder von diesem Istwert eine zusätzliche Größe subtrahiert wird.

5

Schließlich umfaßt die Vergleichseinrichtung vorzugsweise eine Strommeßeinrichtung zum Messen des durch die Elektromagnetanordnung oder durch den gesamten Regelkreis fließenden elektrischen Stromes und eine die Strommeßwerte speichernde und vergleichende Sample- und Hold-Schaltung, u. U. ist dafür auch ein Verzögerungsglied brauchbar, solange der Wert lang genug gehalten wird.

10

Als Lagesensoren können im Prinzip die unterschiedlichsten, nach dem Stande der Technik bekannten Lagesensoren verwendet werden, solange die Lageinformation nur im Stator vorliegt und solange ein evtl. im Rotor vorliegender Sensorteil keine Energie bzw. keine elektrische Kontaktierung benötigt. Jedoch sind Magnetfeldsensoren im allgemeinen nicht brauchbar (Magnet im Rotor), weil solche Sensoren vom Magnetfeld der magnetischen Rotorlagerung beeinflusst werden können und sich dadurch ungünstige Rückwirkungen ergeben; kapazitive Sensoren zur Lageermittlung sind aus verschiedenen Gründen praktisch nicht brauchbar oder sehr problematisch, und zwar einmal deswegen, weil dadurch im Blut ein elektrisches Feld erzeugt wird und eine problematische Kontaktierung notwendig ist, wenn die Kondensatorplatten eines solchen Sensors zwischen Stator und Rotor vorgesehen sind, zum anderen deswegen, weil in den Fällen, in denen die beiden Kondensatorplatten des Sensors am Gehäuse vorgesehen werden, eine Änderung die Dielektrikums zwischen diesen Kondensatorplatten durch den Rotor erfolgt. Erfindungsgemäß werden als Lagesensoren bevorzugt Strahlungssensoren verwendet, insbesondere solche, die mit Lichtstrahlung oder Schallstrahlung arbeiten, vorzugsweise Infrarotsensoren oder Ultraschallsensoren

25

30

35

Im einzelnen ist die magnetische Rotorlagerung nach der Erfindung hinsichtlich ihrer Lagesensoranordnung vorzugsweise so aufgebaut, daß der Lagesensor wenigstens eine von der Rotorwelle betätigte Impulsstrahlungsschranke mit einem impulsgesteuerten Strahlungssendeelement und einem Strahlungsempfangselement umfaßt.

Die Lagesensoreinrichtung, die bevorzugt zwei Lagesensoren und eine daran angekoppelte Lagesensorbetriebsschaltung aufweist, kann insbesondere folgendes umfassen:

- (1) zwei Impulsstrahlungsschranken, von denen je eine mit je einem axialen Ende der Rotorwelle zusammenwirkt;
- (2) eine die Ausgangssignale der Strahlungsempfangselemente der beiden Impulsstrahlungsschranken subtrahierende Subtraktionseinrichtung;
- (3) eine die Ausgangssignale der Subtraktionseinrichtung integrierende Integrationseinrichtung;
- (4) eine an den Ausgang der Integrationseinrichtung angeschlossene Sample- und Hold-Schaltung; und
- (5) eine Ablaufsteuereinrichtung zur Steuerung des Schließ- und Öffnungstakts eines ersten, zweiten und dritten Schalters, von denen der erste Schalter zwischen dem Ausgang der Subtraktionseinrichtung und dem Eingang der Integrationseinrichtung vorgesehen ist, während der zweite Schalter ein die Rückstellung der Integrationseinrichtung bewirkender Schalter ist und der dritte Schalter zwischen dem Ausgang der Integrationseinrichtung und dem Eingang der Sample- und Hold-Schaltung angeordnet ist, wobei die Ablaufsteuereinrichtung die Schließzeiten der drei Schalter derart steuert, daß

der erste Schalter immer dann geschlossen ist, wenn die Strahlungssendeelemente senden, während das Schließen des dritten Schalters jeweils nach Integration einer vorbestimmten Anzahl von Ausgangssignalen der Subtraktionseinrichtung erfolgt und der zweite Schalter
5 jedesmal nach Öffnen des dritten Schalters geschlossen wird.

Wie sich aus den obigen Ausführungen über die bevorzugt
10 verwendeten Sensoren bereits ergibt, sind die Impulsstrahlungsschranken vorzugsweise entweder Infrarotlichtschranken oder Ultraschallschranken. Der Vorteil der Infrarotsensoren bzw. -lichtschranken und der Ultraschallsensoren bzw. -schranken besteht insbesondere darin, daß beide Arten die-
15 ser Sensoren bzw. Schranken von den elektrischen oder magnetischen Eigenschaften der Umgebung entkoppelt sind, weil Infrarotlicht oder Ultraschallstrahlung praktisch nicht von diesen elektrischen oder magnetischen Eigenschaften beeinflusst werden. Abgesehen hiervon haben die bei der
20 Anwendung von Infrarotlicht verwendeten LED-Dioden einen sehr geringen Energiebedarf und sind preiswert sowie klein.

In Verbindung mit der vorstehend beschriebenen magnetischen Rotorlagerung oder auch unabhängig hiervon kann als Antrieb
25 des Rotors ein Asynchronmotor vorgesehen sein, der an einen Oszillator als Betriebsspannungsquelle angeschlossen ist, dessen Frequenz und Ausgangsspannungsamplitude last- und drehzahlabhängig derart veränderbar sind, daß das vom Asynchronmotor abgegebene Drehmoment bei der jeweiligen
30 Drehzahl des Asynchronmotors mit dem Lastmoment korreliert, insbesondere das jeweilige Lastmoment des Rotors auf der Motorkennlinie des Asynchronmotors wenig unterhalb des Kippmoments und oberhalb der Kippdrehzahl liegt.

Es ist weiter ein elektronisch kommutierter Gleichstromantrieb besonders vorteilhaft. Hierzu können insbesondere Permanentmagneten in Form von Magnetscheiben oder sonstigen magnetisierten Bereichen im Rotor, vorzugsweise
5 um dessen äußeren Umfang herum bzw. in dessen äußerem Umfang, als alternierende Magnetpole vorgesehen sein, denen im Stator beidseitig oder einseitig eisenlose stromdurchflossene Drahtschleifen gegenüberstehen, die möglichst den gesamten magnetischen Fluß der vorgenannten Permanentmag-
10 neten des Rotors erfassen, wobei der elektrische Strom in den Drahtschleifen so kommutiert wird, daß eine Rotation des Rotors bewirkt wird.

Bei Verwendung des Rotors als Förderorgan in einer Blutpumpe, insbesondere einer Zentrifugalblutpumpe, kann eine Antriebsleistungssteuereinrichtung vorgesehen sein, die folgendes umfaßt:

- 20 (a) einen Drucksensor auf der Saugseite der Blutpumpe;
- (b) einen mit seinem Eingang an den Drucksensor angeschlossenen und einer vorbestimmten Eingangsgröße eine bestimmte Ausgangsgröße zuordnenden und abgebenden Charakteristikspeicher; und
25
- (c) eine die tatsächliche Blutpumpenleistung entsprechend der Ausgangsgröße des Charakteristikspeichers steuernde Leistungssteuereinrichtung, vorzugsweise einen in seiner Frequenz und Ausgangsspannung last- und dreh-
30 zahlabhängig veränderbaren Oszillator, der an einen Asynchronmotor, welcher die Blutpumpe antreibt, als die Betriebsspannungsquelle dieses Asynchronmotors angeschlossen ist.

Obwohl der Antrieb eines magnetischen Rotors, wie er mit der Erfindung zur Verfügung gestellt wird, bevorzugt in der vorstehend genannten Weise erfolgt, kann der Antrieb aber alternativ auch auf irgendeine andere geeignete Weise ausgebildet sein, zum Beispiel ein Synchronmotor, ein elektronisch kommutierter permanentmagnetisch erregter Elektromotor o. dgl. sein. Und obwohl der vorstehend beschriebene Asynchronmotorantrieb bevorzugt bei einem Rotor angewandt wird, welcher eine erfindungsgemäß ausgebildete magnetische Rotorlagerung besitzt, kann dieser Asynchronmotorantrieb auch mit Vorteil bei anders gelagerten Rotoren verwendet werden, zum Beispiel bei solchen Rotoren, die ausschließlich mittels Elektromagneten magnetisch gelagert sind, oder bei Rotoren, die eine gemischt elektromagnetische-permanentmagnetische Rotorlagerung der Art haben, wie sie in der US-Patentschrift 3 938 913 und in der europäischen Offenlegungsschrift 0 060 569 beschrieben ist, oder bei irgendeiner anderen magnetischen oder mechanischen oder hydraulischen oder sonstigen Rotorlagerung.

20

Die vorstehenden sowie weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung seien nachfolgend unter Bezugnahme auf die Fig. 1 bis 5 der Zeichnung anhand einiger besonders bevorzugter Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Rotorlagerung und anhand einer bevorzugten Ausführungsform eines Rotorantriebs nach der Erfindung näher erläutert; es zeigen:

Fig. 1 eine Gesamtdarstellung einer besonders bevorzugten Ausführungsform einer magnetischen Rotorlagerung nach der Erfindung und einen erfindungsgemäßen Rotorantrieb eines Rotors einer doppelblutigen Radial-Zentrifugalblutpumpe, die perspektivisch zusammen mit den Permanent- und den Elektromagneten, in denen der Rotor dieser Zen-

30

35

trifugalblutpumpe magnetisch berührungslos gelagert ist bzw. angetrieben wird, dargestellt ist, während die Regelschaltung der magnetischen Rotorlagerung und die Antriebsschaltung für den Rotor in Blockdarstellung veranschaulicht sind;

Fig. 2 eine Schnittansicht durch eine zur magnetischen Lagerung eines Rotors einer Blutpumpe nach Fig. 1 dienende Magnetanordnung mit gestrichelt eingezeichnetem Rotor;

Fig. 3 eine bevorzugte Ausführungsform einer portional regelnden Endstufe, die in der Regelschaltung der magnetischen Rotorlagerung nach Fig. 1 vorgesehen ist;

Fig. 4a und 4b je eine Kurvendarstellung, die den zeitlichen Verlauf der Spannung bzw. des Stroms zeigt, die an bzw. der Wicklung des Elektromagneten erzielbar ist, welcher an die in Fig. 3 gezeigte Endstufe angeschlossen ist;

Fig. 5 eine Kurvendarstellung, die ein Beispiel der optimalen Wahl der Betriebsparameter des Asynchronmotors veranschaulicht, der in Fig. 1 als Rotorantrieb verwendet wird, und

Fig. 6 eine Ausführungsform einer Axial-Zentrifugalblutpumpe nach der Erfindung.

30

Die magnetische Rotorlagerung und der Rotorantrieb, die in Fig. 1 dargestellt sind, dienen hier zum Lagern und Antrieb des Rotors 1 einer doppelblutigen Radial-Zentrifugalblutpumpe 3, welche zwei Blutzufußkanäle 3a und 3b und einen Blutauslaß 4 hat, die in einem als Gehäuse der Zentrifugalblutpumpe 2 dienenden Stator 5 ausgebildet sind, in welchem der Rotor 1 magnetisch berührungslos ge-

Die magnetische Rotorlagerung umfaßt eine erste und zweite mit 6a bzw. 6b bezeichnete Permanent- und Elektromagnetanordnung in je einem der beiden axialen Endbereiche des Rotors 1 sowie eine Regelschaltung 7 zum Betrieb des
5 Elektromagneten der Permanent- und Elektromagnetanordnungen 6a und 6b. Außerdem umfaßt die magnetische Rotorlagerung zwei, jeweils als Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b ausgebildete Lagesensoren für die Ermittlung der axialen Position des Rotors 1 und eine Lagesensorbetriebs-
10 schaltung 9, die Eingangssignale von den Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b erhält und ein entsprechendes Ausgangssignal an die Regelschaltung 7 abgibt.

Der Rotorantrieb umfaßt zwei Antriebselektromagneten 10a und 10b, die zusammen mit dem metallischen Körper des
15 Rotors 1 einen Asynchronmotor bilden, und eine Antriebsleistungssteuereinrichtung 11 mit einem auf der Saugseite der Zentrifugalblutpumpe 2, vorliegend im Blutzuflußkanal 3b, angeordneten Drucksensor 12. Die Drehung des
20 Rotors 1 ist durch Pfeile 13 angedeutet, während der Blutfluß durch Pfeile 14 dargestellt ist.

Der Rotor 1 samt seiner Achse, der beispielsweise aus poliertem Aluminium bestehen kann, ist innen hohl, so daß
25 seine Gesamtdichte genau derjenigen des ihn umgebenden Blutes angepaßt ist. Durch die beiden Blutzuflußkanäle 3a und 3b wird der Blutstrom von beiden Seiten an den scheibenförmigen Rotor 1 herangeführt und von diesem zentrifugal über einen Blutringkanal 15 zentrifugal aus dem als Gehäuse
30 dienenden Stator 5 getrieben, so daß infolgedessen keine Asymmetrischen Kräfte auf den Rotor 1 durch dessen Betrieb entstehen.

Der Energiebedarf des Rotorantriebs beträgt in einer beispielsweise Ausführungsform etwa 8-10 Watt bei einem konstanten Blutdruck von 0,133 bar und ist damit wesentlich niedriger als derjenige von pulsierend arbeitenden Blutpumpen. Der Energiebedarf der magnetischen Rotorlagerung beträgt in dieser beispielsweise Ausführungsform nur etwa 0,5 Watt. Aufgrund dieses geringen Energiebedarfs können die Batterie- oder Akkumulatorensätze zur Energieversorgung verhältnismäßig klein und leicht sein und implantiert werden und brauchen erst nach einem oder zwei Tagen erneuert oder z.B. nachts neu aufgeladen zu werden.

Im einzelnen sind die Permanent- und Elektromagnetanordnungen 6a und 6b der magnetischen Rotorlagerungen, die in Fig. 2 in gegenüber Fig. 1 vergrößertem Maßstab dargestellt sind, so ausgebildet, daß der Rotor 1 im Bereich jedes seiner beiden axialen Enden mittels einer Permanentmagnetanordnung bis auf einen einzigen geometrischen Verstellfreiheitsgrad, der sich vorliegend in Axialrichtung des Rotors 1 erstreckt, stabil berührungsgelos im Stator 5 aufgehängt ist. Diese den Rotor 1 aufhängende Permanentmagnetanordnung umfaßt einen konzentrisch zur Rotorachse 16 angeordneten Ringpermanentmagneten 17a bzw. 17b, der ortsfest im Stator 5 vorgesehen ist, und einen konzentrisch zum Ringpermanentmagneten 17a, 17b auf der Rotorachse 16 und innerhalb des Rotors 1 angeordneten Stabpermanentmagneten 18a bzw. 18b (Fig. 1 und 2) oder Ringpermanentmagneten 18c bzw. 18d (Fig. 6).

Im einzelnen ist der Ringpermanentmagnet 17a bzw. 17b in Axialrichtung des Rotors 1 magnetisiert, wie in Fig. 2 und 6 durch die Angabe der Nordpole N und Südpole S angedeutet ist. Weiter ist der Stabpermanentmagnet 18a bzw. 18b bzw. der Ringpermanentmagnet 18c bzw. 18d des Rotors bezüglich des zugeordneten Ringpermanentmagneten 17a bzw. 17b des Stators axial derart versetzt angeordnet, daß er sich gera-

- de außerhalb des Ringpermanentmagneten 17a bzw. 17b des Stators befindet bzw. diesen eben noch berührt. Auf diese Weise ergibt sich eine optimale radial zentrierende Kraftwirkung der jeweils aus einem Ringpermanentmagneten 17a bzw. 17b im Stator und einem Stabpermanentmagneten 18a bzw. 18b bzw. Ringpermanentmagneten 18c bzw. 18d im Rotor bestehenden Permanentmagnetanordnung. Auch die Stabpermanentmagnete 18a und 18b bzw. die Ringpermanentmagnete 18c und 18d sind in Axialrichtung des Rotors magnetisiert (siehe die Polangaben in Fig. 2 und 6), und sie rotieren zusammen mit dem Rotor 1 um die Rotorachse 16 oder können frei drehbar im Rotor 1 gelagert sein, so daß sie sich dann nicht mit demselben mitdrehen.
- 15 Außerdem weist jede der beiden Permanent- und Elektromagnetanordnungen 6a und 6b je einen ringförmigen Elektromagneten 19a bzw. 19b auf, innerhalb dessen der Stabpermanentmagnet oder der Ringpermanentmagnet des Rotors angeordnet ist. Die Elektromagnete 19a und 19b sind konzentrisch zur Rotorachse 16 ortsfest im Stator 5 vorgesehen.

- Infolgedessen befindet sich der Elektromagnet 19a bzw. 19b in magnetischer Wechselwirkung mit dem zugeordneten zylinderförmigen Stabpermanentmagneten 18a bzw. 18b oder dem Ringpermanentmagneten 18c bzw. 18d des Rotors 5, wobei sich der Stabpermanentmagnet 18a bzw. 18b bzw. der Ringpermanentmagnet 18c bzw. 18d des Rotors 5 seinerseits in magnetischer Wechselwirkung mit dem zugeordneten Ringpermanentmagneten 17a bzw. 17b des Stators befindet. Durch die Elektromagneten 19a und 19b in Wechselwirkung mit den Permanentmagneten 18a und 18b bzw. 18c und 18d wird die axiale Lage des Rotors 1 zentriert und stabilisiert. In Symmetrie und Mittellage kompensieren sich die axialen Permanentmagnet-Kräfte gerade, so daß labiles Gleichgewicht entsteht.

Um die Zentrierung und Stabilisierung zu bewirken, wird das Magnetfeld der beiden Elektromagneten 19a und 19b, die über entsprechende Leitungen 20a bzw. 20b an den Ausgang 21 der Regelschaltung 7 angeschlossen sind, laufend
5 geregelt.

In Fig. 6 ist eine Ausführungsform einer Axial-Zentrifugalblutpumpe dargestellt, in der für gleichartige Teile wie in Fig. 1 und 2 die gleichen Bezugszeichen verwendet
10 worden sind, wobei nachstehend nur die demgegenüber unterschiedlichen Merkmale beschrieben sind, im übrigen aber auf die Beschreibung der Figuren 1 und 2 verwiesen wird.

Im Gegensatz zu der oben erläuterten Radial-Zentrifugalpumpe ist der Rotor 1 in Fig. 6 rohrförmig ausgebildet, und am inneren Rohrumfang desselben sind Flügel- bzw. Schraubenprofile 100 zum Fördern des Bluts durch das Rohrinne vorgesehen, die am Bluteintritt bei 100a und am Blutaustritt bei 100b zugespitzt verlaufen. Anstelle
20 der in Fig. 1 und 2 vorgesehenen Stabpermanentmagnete 18a und 18b sind hier im Rohrmantel des Rotors 1 an beiden axialen Enden die bereits erläuterten Ringpermanentmagnete 18c und 18d vorgesehen, wobei die gleiche Polarisationsart (einander entgegengesetzte Pole gegenüberliegend) wie
25 in Fig. 1 und 2 angewandt ist (siehe die Polbezeichnungen N und S in Fig. 6).

Im Zwischenraum 101 zwischen dem Außenumfang des Rotors 1 und dem Innenumfang des Stators 5 sollte vorzugsweise
30 eine Rückströmung des Bluts entgegengesetzt zu den Richtungen der Pfeile 14 verhindert oder vermindert werden. Das kann durch Förderflügel (nicht dargestellt) geschehen, die auf dem Außenumfang des Rotors 1 oder in Öffnungen vorgesehen sind, welche zwischen dem Ringpermanentmagneten 18c und/oder 18d und dem Kurzschlußring 10c des Rotors 1
35

ausgebildet sind und durch den Rohrmantel des Rotors 1 hindurchgehen, oder dadurch, daß die zuletzt erwähnten Öffnungen als in Radial- und Axialrichtung schraubenförmig verlaufende Förderkanäle ausgebildet sind, die das
5 Blut in Richtung der Pfeile 14 im Zwischenraum 101 fördern.

Außerdem können im Blutzufußkanal 3c vor dem Rotor 1 und/oder im Blutauslaß 4 hinter dem Rotor 1 feststehende Umlenkschaufeln 102, 103 zum Erreichen eines zufriedenstellenden Wirkungsgrades vorgesehen sein.
10

Zum Antrieb der Axial-Zentrifugalblutpumpe der Fig. 6 ist anstelle der beiden Elektromagneten 10a und 10b der Fig. 1
15 ein einziger Elektromagnet 10 im Stator 5 angeordnet, der mit dem Kurzschlußring 10c des Rotors 1 in der gleichen Weise wie anhand der Fig. 1 und 5 erläutert, als Asynchronmotor zusammen wirkt. Bei 105 sind die Erregerwicklungen des Elektromagneten 10 angedeutet.

20

Die Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b wirken durch Bohrungen 104a und 104b im Ringpermanentmagneten 17a bzw. 17b mit den zugespitzt verlaufenden axialen Enden 23a und 23b des Rotors 1 zusammen.

25

Es sei nun die stabilisierende und zentrierende Regelung der axialen Rotorposition in den Zentrifugalblutpumpen nach Fig. 1 und 6 näher erläutert.

30 Zum Zwecke dieser Regelung ist der Istwert-Eingang 22 der Regelschaltung 7 an den Ausgang der Lagesensorbetriebschaltung 9 angeschlossen, an dem ein Signal erhalten wird, welches die tatsächliche Position des Rotors 1 repräsentiert, wie sie mittels der Impulsstrahlungsschranken
35 8a und 8b in Zusammenwirken mit den axialen Enden 23a und 23b des Rotors 1 abgefühlt wird.

Zu Ihrem Betrieb sind die Strahlungssendeelemente 24a und 24b, beispielsweise je eine im Infrarotbereich arbeitende LED-Diode oder je ein Ultraschallsender, über eine Leitung 25 an den Ausgang eines Verstärkers 26 angekoppelt, dessen Eingang mit dem Ausgang eines Oszillators 27 verbunden ist. Der Verstärker 26 und der Oszillator 27 gehören zu der Lagesensorbetriebsschaltung 9, deren Signaleingänge 28a und 28b an je eines der Strahlungsempfangselemente 29a bzw. 29b der Impulsstrahlungsschranken 8a bzw. 8b angeschlossen sind. Diese Strahlungsempfangselemente 29a und 29b sind vorzugsweise ein Infrarotsensor oder ein Ultraschallsensor.

Die Regelschaltung 7, die ihren Istwert von der Lagesensorbetriebsschaltung 9 oder im einfachsten Fall von einem die axiale Position des Rotors 1 ermittelnden Lagesensor erhält, regelt die elektrische Stromstärke in den Elektromagneten 19a und 19b so, daß der am Istwert-Eingang 22 erhaltene Istwert schließlich mit einem vorgegebenen Sollwert für die axiale Position des Rotors 1 übereinstimmt.

Zu diesem Zweck umfaßt die Regelschaltung 7 z.B. einen unmittelbar an den Istwert-Eingang 22 angeschlossenen Vorverstärker 30, dessen Ausgang an einen nachfolgenden Regelverstärker 31 angeschlossen ist, der seinerseits einen stromproportional regelnden Endverstärker 32 aussteuert. Außerdem weist die Regelschaltung 7 einen hierarchischen bzw. übergeordneten Regler 33 auf, der weiter unten näher erläutert ist.

30

Der Regelverstärker 31 ist vorzugsweise ein PDT-Regelverstärker, d. h. ein Proportional-Differential-Regelverstärker mit Zeitglied. Die Vorteile dieses Regelverstärkers bestehen insbesondere darin, daß das Systemrauschen unterdrückt und die Regelstabilität verbessert wird.

35

Der Endverstärker 32 wandelt eine gegebene Eingangsspannung in einen proportionalen Ausgangsstrom um, und zwar unabhängig von den elektrischen Lastverhältnissen. Auf diese Weise lassen sich trotz der relativ großen Induktivität der geregelten Elektromagnete 19a und 19b nahezu augenblickliche, i.h. z.B. treppenförmige Stromanstiege erzielen, indem die Spannung, wie in Fig. 4a gezeigt ist, zunächst wesentlich stärker erhöht wird, als es dem gewünschten Stromanstieg entspricht, und dann verhältnismäßig schnell auf einen, dem gewünschten Strom tatsächlich entsprechenden Spannungswert abgesenkt wird.

Ein Beispiel eines stromproportional regelnden Endverstärkers 33 ist in Fig. 3 dargestellt. Dieser Endverstärker 32 umfaßt einen Operationsverstärker 34, der über die als Last vorgesehene Magnetfeldspule 35 des Elektromagneten 19a bzw. 19b und einen niederohmigen Widerstand R an Masse gelegt ist. Die am Widerstand R abfallende Spannung, die proportional dem Strom durch die Magnetfeldspule 35 ist, wird über einen aus den Widerständen R_1 und R_2 gebildeten Spannungsteiler auf den negativen Eingang 36 des Operationsverstärkers 34, der auch als Gegenkopplungseingang bezeichnet werden kann, zurückgeführt. Der positive Eingang 37 des Operationsverstärkers 34 ist an den Ausgang des Regelverstärkers 31 angekoppelt.

Es seien nun der Aufbau und die Betriebsweise der Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b und der Lagesensorbetriebschaltung 9 erläutert:

Wie bereits erwähnt, wirkt die Impulsstrahlungsschranke 8a mit dem einen axialen Ende 23a des Rotors 1 zusammen, so daß je nach der axialen Position des Rotors Strahlung von dem Strahlungssendeelement 24a, wie durch die beiden

empfangselement 29a gelangen kann oder durch das axiale Ende 23a des Rotors 1 daran gehindert wird, auf das Strahlungsempfangselement 29a zu fallen. In entsprechender Weise wirken das Strahlungssendeelement 24b und das Strahlungsempfangselement 29b mit dem anderen axialen Ende 23b des Rotors zusammen. Im vorliegenden Fall sind als Strahlungssendeelement Infrarotstrahlungssendeelemente und als Strahlungsempfangselemente Infrarotstrahlungsempfangselemente vorgesehen.

10

Der Oszillator 27, der beispielsweise auch allgemein ein Impulsgenerator sein kann, hat bevorzugt eine Frequenz, die im Bereich von 10 bis 100 kHz liegt, und zwar besonders bevorzugt 40 kHz beträgt. Die Infrarotstrahlungssendeelemente sind so gewählt, daß sie Infrarotstrahlung in einem Wellenlängenbereich erzeugen, in dem Blut eine geringe Absorptionsfähigkeit hat, d. h. bei etwa 1 nm.

Hinsichtlich des obigen Frequenzbereichs des Oszillators 27 sei darauf hingewiesen, daß das System zu langsam reagieren würde, wenn die Impulsfrequenz wesentlich niedriger als 10 kHz gewählt werden würde, und zwar aufgrund der Signalverarbeitung in dem weiter unten erläuterten Integrator; und wenn andererseits die Impulsfrequenz des Oszillators 27 wesentlich höher als 100 kHz gewählt wird, dann ist der elektrooptische Wirkungsgrad, der als Infrarotstrahlungssendeelemente verwendeten lichtemittierenden Dioden ungünstig und die Auswertung durch Hochfrequenzeffekte erschwert.

30

Die Infrarotstrahlungsempfangselemente sind vorzugsweise Photodioden oder -transistoren, deren maximale spektrale Empfindlichkeit im gleichen Bereich wie die maximale Emmissionsfähigkeit der Infrarotstrahlungssendeelemente liegt.

35

Der Teil der Lagesensorbetriebsschaltung 9, mittels dessen die Ausgangssignale der Strahlungsempfangelemente 29a und 29b zu dem an den Eingang 22 der Regelschaltung 7 abzugebenden Istwert verarbeitet werden, umfaßt eine Subtraktionseinrichtung 38, welche die Signale von den beiden Strahlungsempfangelementen 29a und 29b voneinander subtrahiert, sowie eine nachgeschaltete Integrationseinrichtung 39, der eine Samp - und Hold-Schaltung nachgeschaltet ist. Außerdem ist ein erster Schalter S1 zwischen dem Ausgang der Subtraktionseinrichtung 38 und dem Integrationseingang der Integrationseinrichtung 39 vorgesehen; ein zweiter Schalter S2 ist zwischen dem Rückstellanschluß 41 der Integrationseinrichtung 39 und Masse vorgesehen und dient dazu, die Integrationseinrichtung 39 jeweils zurückzustellen; und schließlich ist ein dritter Schalter S3 zwischen dem Ausgang der Integrationseinrichtung 39 und dem Eingang der Abtast- und Halteschaltung 40 angeordnet, deren Ausgang an den Istwert-Eingang 22 der Regelschaltung angekoppelt ist. Zur Steuerung des Schließens und Öffnens der Schalter S1, S2 und S3 ist eine Ablaufsteuereinrichtung 42 in der Lagesensorbetriebsschaltung 9 vorgesehen, die Eingangssignale von dem Oszillator 27 erhält, da die Schalter S1, S2 und S3 in einer weiter unten näher erläuterten Weise synchron mit den Signalen geöffnet und geschlossen werden, welche an den Signaleingängen 28a und 28b eintreffen.

Damit die Lagesensorbetriebsschaltung 9 nicht einfach die elektrischen Impulse, welche aufgrund der Strahlungsimpulse von den Strahlungsempfangelementen 29a und/oder 29b abgegeben werden, mit hoher Zeitkonstante integriert, was eine Ansprechverzögerung der gesamten Regelung der Elektromagneten 19a und 19b bedeuten und damit unter Umständen zu Eigenschwingungen führen würde oder bei Einwirkung

Zunächst ist zwischen die Strahlungsempfängselemente 29a und 29b, die im Falle der Verwendung von Infrarotstrahlung z. B. Phototransistoren oder -dioden oder sonstige Photoempfänger sind, und die gleichzeitig als Vorverstärker arbeitende Integrationseinrichtung 39, die bereits erwähnte Subtraktionseinrichtung 38 geschaltet. Diese Subtraktionseinrichtung 38 subtrahiert die Ausgangssignale der Strahlungsempfängselemente 29a und 29b, was insbesondere folgenden Zweck und folgende Vorteile hat:

10

(a) Eine Störung durch Fremdstrahlung wird vermindert, und zwar insbesondere deswegen, weil eventuelle Fremdstrahlung, die von außen her kommt, etwa in gleicher oder ähnlicher Stärke an beiden Strahlungsempfängselementen 29a und 29b wirksam wird und sich bei der Subtraktion der Signale dieser Strahlungsempfängselemente der Anteil der Fremdstrahlung vollständig oder doch zu einem wesentlichen Teil gegenseitig aufhebt. Außerdem ist eine Fremdstrahlung, die genau mit 40 kHz und phasenrichtig das Sendesignal stört, sehr unwahrscheinlich.

15

20

25

30

35

(b) Der Arbeitsbereich der gesamten Sensoranordnung wird, was die Ermittlung der axialen Position des Rotors 1 anbetrifft, erweitert, und zwar in Verbindung mit der Anordnung der Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b derart, daß sich diese Impulsstrahlungsschranken nur in einem kleinen Arbeitsbereich überlappen, d. h. daß der Übergangsbereich zwischen vollständigem Schließzustand und vollständigem Öffnungszustand dieser beiden Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b nicht vollständig zusammenfällt, sondern sich diese Übergangsbereiche nur in einem, bezogen auf den jeweiligen gesamten Übergangsbereich kleinen Teil überlappen, was bedeutet, daß sich beide Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b nur über eine kleine Länge ihres "Übergangsbereichs" überlappen.

(c) Durch die Subtraktion der Ausgangssignale der beiden Strahlungsempfangelemente 29a und 29b wird die Kennlinie der Lagesensoranordnung, also der gesamten Anordnung aus den Pulsstrahlungsschranken 8a und 8b und
5 der Lagesensorbetriebsschaltung 9 in dem vorstehend definierten überlappenden Arbeitsbereich linearisiert.

Die Integrationseinrichtung 39 arbeitet so, daß sie die am Ausgang der Subtraktionseinrichtung 38 erhaltenen Differenzimpulse, die durch die Subtraktion der pulsförmigen
10 Ausgangssignale der Strahlungsempfangelemente 29a und 29b erhalten worden sind, periodisch nur über jeweils wenige einzelne Differenzimpulse, beispielsweise vier Differenzimpulse integriert und dann an ihrem Ausgang über den
15 Schalter S3 diesen Integrationswert an die Abtast- und Halteschaltung 40 weitergibt. Die Integration kann eine von der Breite der Differenzimpulse unabhängige Amplitudenintegration sein; und die Integrationszeitkonstante kann sehr hoch gewählt werden, d. h. sie kann gegen Unendlich
20 gehen.

Durch diese Art der Weiterverarbeitung der Differenzimpulse in der Integrationseinrichtung 39 werden insbesondere folgende Vorteile erzielt:

25

(1) Die gesamte Lagesensoranordnung reagiert trotz sehr großer Integrationszeitkonstanten der Integrationseinrichtung 39 praktisch sofort, d. h. nach wenigen einzelnen Differenzimpulsen, z. B. nach vier Differenzimpulsen, auf eine Amplitudenänderung, so daß die Lage-
30 sensoranordnung sehr schnell auf axiale Lageveränderungen des Rotors 1 anspricht, da gleichzeitig die Impulsfolgefrequenz, wie oben erwähnt, im Bereich zwischen 10 bis 100 kHz, bevorzugt bei 40 kHz liegt. Bei der

vorgenannten bevorzugten Impulsfolgefrequenz beträgt daher die Ansprechzeit etwa 10 msec. Diese Ansprechzeit kann je nach Bedarf durch Veränderung der Impulsfolgefrequenz und/oder der Zahl der periodisch integrierten einzelnen Differenzimpulse je nach den praktischen Bedürfnissen vergrößert oder verkleinert und damit optimal eingestellt werden.

(2) Da sich normalerweise. allein schon bedingt durch die Trägheit des Rotors 1 innerhalb der vorerwähnten kurzen Ansprechzeit der gesamten Lagesensoranordnung keine relativ großen Änderungen der axialen Position des Rotors 1 ergeben, erfolgt aufgrund der angewandten Integrationsweise die Veränderung des am Istwert-Eingang 22 auftretenden Istwerts, der praktisch gleich dem integrierten Wert ist, und damit die Einregelung der Elektromagnete 19a und 19b durch die Regelschaltung 7 auf einen neuen Wert der integrierten Amplituden der Differenzimpulse nicht abrupt sondern allmählich, so daß keine Istwert-Sprünge stattfinden, durch die Eigenschwingungen angeregt werden könnten.

In der Sample- und Hold-Schaltung 40 wird der am Ausgang der Integrationseinrichtung 39 erhaltene Integrationswert jeweils solange festgehalten und als Istwert auf den Istwert-Eingang 22 gegeben, bis der Sample- und Hold-Schaltung 40 über den Schalter S3 ein neuer Integrationswert von der Integrationseinrichtung 39 zugeführt wird.

Die Ablaufsteuereinrichtung 42 schließt und öffnet die Schalter S1, S2 und S3 in der nachfolgend angegebenen Weise, wozu sie ihre Taktfrequenz über eine Leitung 43 von dem Impulsgenerator bzw. Oszillator 27 erhält:

- (a) Der erste Schalter S1 ist immer dann geschlossen, wenn die Strahlungssendeelemente 24a und 24b eingeschaltet sind und damit das Strahlungsempfangselement 29a und/oder das Strahlungsempfangselement 29b ein Ausgangssignal abgibt, also ein Differenzimpuls am Ausgang der Subtraktionseinrichtung 38 abgegeben wird. In der Zwischenzeit zwischen dem Auftreten von aufeinanderfolgenden Differenzimpulsen ist dagegen der Schalter S1 geöffnet. Das bedeutet, daß die Differenzimpulse der Subtraktionseinrichtung synchron zum Impulsbetrieb der Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b an die Integrationseinrichtung 39 weitergegeben werden. Auf diese Weise wird der Einfluß von etwaiger Störstrahlung wesentlich vermindert.
- (b) Der dritte Schalter S3 wird nach jeweils einer vorbestimmten Anzahl von Differenzimpulsen, beispielsweise nach jeweils vier Differenzimpulsen geschlossen, so daß jeder der periodisch durch die Integrationseinrichtung 39 erhaltenen Integrationswerte jeweils an die Sample- und Hold-Schaltung 40 weitergegeben und damit als Istwert für die Regelschaltung verfügbar gemacht wird.
- (c) Nachdem der jeweilige Integrationswert durch Schließen des Schalters S3 an die Sample- und Hold-Schaltung 40 weitergegeben und der Schalter S3 wieder geöffnet worden ist, wird der zweite Schalter S2 geschlossen, um den alten Integrationswert in der Integrationseinrichtung 39 zu löschen.
- (d) Der zweite Schalter S2 und der dritte Schalter S3 werden vorzugsweise jeweils nur innerhalb einer Öffnungsperiode des ersten Schalters S1 geschlossen; jedoch können die Schalter S2 und S3 auch längere Zeit geschlossen sein, sie dürfen jedoch niemals gleichzeitig geschlossen sein, sondern der Schalter S3 muß immer

- vor dem Schalter S2 geschlossen werden, und der Schalter S2 darf immer erst nach dem Öffnen des Schalters S3 geschlossen werden, damit nicht ein Null-Integrationswert an die Sample- und Hold-Schaltung
- 5 40 abgegeben und damit ein völlig falscher und zudem sprunghaft geänderter Istwert am Istwert-Eingang 22 erhalten wird. Solange unter Einhaltung dieser Bedingungen der Schalter S2 geschlossen ist, erfolgt einfach keine weitere Integration mehr, so daß durch
- 10 eine längere Schließperiode des Schalters S2 auch die Ansprechzeit der gesamten Lagesensoranordnung auf axiale Positionsänderungen des Rotors 1 vergrößert werden kann. Wird der Schalter S3 unter Einhaltung der obigen Bedingungen länger geschlossen gehalten,
- 15 so bedeutet das, daß dadurch die Anzahl der periodisch amplitudenintegrierten Differenzimpulse erhöht, also ebenfalls die Ansprechzeit der gesamten Lagesensoranordnung vergrößert wird.
- 20 Die Ablaufsteuereinrichtung 42 ist bevorzugt eine Digitalsteuereinrichtung, insbesondere schon deswegen, weil sie zur Betätigung der Schalter S1, S2 und S3 dient, die jeweils nur zwei Zustände, nämlich einen Öffnungs- oder Schließzustand haben.
- 25 Das allgemeine Prinzip, welches der vorstehend beschriebenen Lagesensorbetriebsschaltung 9 zugrundeliegt, besteht infolgedessen darin, daß die zur Ermittlung der axialen Position des Rotors 1 dienenden Lagesensoren, vorliegend
- 30 die Impulsstrahlungsschranken 8a und 8b, impulsmäßig betrieben werden, daß durch Differenzbildung der Lagesensorsignale Störungen ausgeschaltet werden, daß die Integration der Differenzimpulse intermittierend über nur jeweils wenige Einzel-Differenzimpulse erfolgt, daß die zu
- 35 integrierenden Differenzimpulse der Integrationseinrichtung synchron zum Auftreten der Strahlungsimpulse in den

Lagesensoren zugeführt werden, und daß der intermittierend ermittelte Integrationswert auch in den Zwischenzeiten zwischen zwei Integrationsintervallen am Ausgang der Lagesensorbetriebsschaltung 9 und damit am Istwert-Eingang 5 22 der Regelschaltung 7 gehalten wird.

Ein etwaiger Einfluß von Störstrahlung auf die Lagesensoren und damit auf den Istwert der Regelschaltung wird insgesamt vor allem durch folgende Maßnahmen ausgeschaltet:

- 15 (1) Durch Paarung von schmalbandigen Strahlungssendeelementen 24a und 24b mit schmalbandigen Strahlungsempfängselementen 29a und 29b, beispielsweise durch die Paarung von schmalbandigen Infrarot-Strahlungssendeelementen und Infrarot-Strahlungsempfängselementen, deren hauptsächlich- 15 Strahlungssende- bzw. -empfangsbereich bei Infrarotstrahlung bei einer Wellenlänge von ca. 1 nm liegt;
- 20 (2) durch eine, vorstehend noch nicht erwähnte, kapazitive Kopplung mit niedriger Zeitkonstanten zwischen den Strahlungsempfängselementen 29a und 29b einerseits und der Subtraktionseinrichtung 38 andererseits, d. h. also durch ein Differenzierglied, das nur schnelle Spannungsänderungen durchläßt; 25
- (3) durch die Subtraktionseinrichtung 38, wie oben näher erläutert;
- 30 (4) durch synchronisierte Übernahme der Differenzimpulse von der Subtraktionseinrichtung 38 in die Integrations-einrichtung mittels entsprechender Ablaufsteuerung, wie oben erläutert; und

- (5) durch periodische Integration von jeweils nur mehreren einzelnen Differenzimpulsen, beispielsweise von vier Differenzimpulsen; hierdurch wird erreicht, daß sogar die Wirkung von etwaigen, sehr kurzzeitigen Störungen, deren Dauer in der Größenordnung der Dauer eines einzelnen Differenzimpulses liegt oder deren Dauer noch kleiner ist, ausgeschaltet wird, da ein durch eine so kurzzeitige Störung verursachter Anteil, der bei einem einzelnen Differenzimpuls groß sein kann, durch die Amplitudenintegration von mehreren Differenzimpulsen gering gemacht wird.

Es sei nun Aufbau und Funktionsweise des übergeordneten Reglers 33 erläutert:

15. Der übergeordnete Regler 33 umfaßt eine Detektionseinrichtung 44, welche das Vorhandensein äußerer Kräfte ermittelt; sowie eine Verstelleinrichtung 45, welche den Rotor 1 beim Auftreten äußerer Kräfte aus seiner in Axialrichtung stabilisierten Mittenlage in eine axial außermittige Stabilisierungslage verstellt und eine Vergleichseinrichtung 46, welche den Energiebedarf der Rotorlage-
20 rung bei in Axialrichtung in der stabilisierten Mittenlage befindlichem Rotor 1 mit dem Energiebedarf der Rotorlage-
25 rung in dem Fall vergleicht, in dem sich der Rotor 1 in Axialrichtung in einer außermittigen Stabilisierungslage befindet.

- Im einzelnen kann die Detektionseinrichtung 44 beispielsweise ein Strommeßeinrichtung sein, die den elektrischen Strom mißt, der durch die Elektromagnete 19a und 19b fließt. Infolgedessen ist in der Darstellung der Fig. 1 die Detektionseinrichtung über Leitungen 47a und 47b an den Ausgang des Endverstärkers 32 bzw. an die Elektromag-
35 nete 19a und 19b angeschlossen. Die Detektionseinrichtung

- 44 kann alternativ auch eine Strommeßeinrichtung sein, welche den elektrischen Strom mißt, der durch den gesamten Regelkreis fließt, welcher die Lagesensoranordnung, den übrigen Teil der Regelschaltung und die Elektromagnetan-
- 5 ordnung umfaßt. Eine weitere Alternative besteht darin, daß die Detektionseinrichtung 44 einen Beschleunigungssensor umfaßt, der die axiale Orientierung oder allgemein die Richtung einer jeweiligen äußeren Kraft detektiert.
- 10 Die Detektionseinrichtung 44 ist im vorliegenden Fall über die Vergleichseinrichtung 46 mit der Verstelleinrichtung 45 verbunden, weil sie die äußeren Kräfte durch Ermittlung des Energiebedarfs der Rotorlagerung detektiert und damit
- 15 nicht nur den Energiebedarf der Rotorlagerung in der axial stabilisierten Mittenlage des Rotors sondern auch den der außermittigen Axialstabilisierungslage des Rotors ermittelt und der Vergleichseinrichtung 46 die Größen liefert, die in der Vergleichseinrichtung miteinander verglichen werden. Wenn dagegen die Detektionseinrichtung 44 die äußeren
- 20 Kräfte unmittelbar feststellt, beispielsweise durch einen Beschleunigungssensor, ohne den Energiebedarf der Rotorlagerung zu ermitteln, dann kann sie direkt mit der Verstelleinrichtung 45 verbunden sein, wobei in diesem Falle zusätzlich eine weitere Detektionseinrichtung zur Er-
- 25 mittlung des jeweiligen Energiebedarfs bzw. einer diesem Energiebedarf proportionalen Größe vorgesehen ist, welche der Vergleichseinrichtung 46 die miteinander zu vergleichenden Energiebedarfswerte der Rotorlagerung liefern.
- 30 Im letzteren Falle ist die Verstelleinrichtung 45 eine sowohl auf das Ausgangssignal der Detektionseinrichtung 44 als auch auf das Ausgangssignal der Vergleichseinrichtung 46 ansprechende Steuereinrichtung, die an ihrem Ausgang ein Signal, beispielsweise eine Spannung abgibt, wodurch über

eine Leitung 48, die zum Vorverstärker 30 oder zum Regel-
verstärker 31 führt, der Sollwert für die axiale Position
des Rotors 1 modifiziert wird, und zwar entweder direkt
oder indirekt dadurch, daß zu dem am Istwert-Eingang 22 erhal-
5 tenen Istwert eine diesen modifizierenden Größe addiert
oder subtrahiert wird, was einer Sollwert-Verschiebung ent-
spricht. In der Schaltung nach Fig. 1 ist die Verstell-
einrichtung 45 nur mit dem Ausgang der Vergleichseinrich-
tung 46 verbunden, weil die Detektionseinrichtung 44 nicht
10 nur das Vorhandensein äußerer Kräfte schlechthin sondern
vielmehr den Energiebedarf der Rotorlagerung ermittelt, so
daß eine Erhöhung dieses Energiebedarfs durch die Ver-
gleichseinrichtung festgestellt und ein entsprechendes
Ausgangssignal von letzterer an die Verstelleinrichtung ab-
15 gegeben wird, welches die Verstelleinrichtung 45 veranlaßt,
den Rotor axial zu verschieben. In jedem Falle erfolgt die
axiale Verschiebung des Rotors durch eine Vergrößerung
oder Verminderung des durch die Elektromagnete 19a und
19b fließenden Stroms infolge der Sollwert-Modifizierung.

20 Die Vergleichseinrichtung 46 kann beispielsweise eine
Abtast- und Halteschaltung umfassen, welche die Energie-
bzw. Leistungsbedarfswerte der Elektromagneten 19a und 19b
sowie des gesamten Regelkreises, die im vorliegenden Fall
25 durch die Detektionseinrichtung 44 ermittelt werden, in
verschiedenen axial veränderten Positionen des Rotors 1
vergleicht und aufgrund dieses Vergleichs ein Ausgangssig-
nal an die Verstelleinrichtung 45 abgibt, das diese veran-
laßt, die axiale Position des Rotors 1 im Sinne niedrige-
30 rer Energie- bzw. Leistungsbedarfswerte der Elektromagnete
19a und 19b zu verschieben. Die Vergleichseinrichtung 46
besitzt zu diesem Zweck einen Speicher, der den bisherigen
Energie- bzw. Leistungsbedarf speichert, damit er mit dem
neuen Energie- bzw. Leistungsbedarf verglichen werden kann.

Die Einstellung der axialen Position des Rotors 1 kann auf diese Weise schrittweise durch aufeinanderfolgende Energie- und Leistungsbedarfsvergleiche und durch aufeinanderfolgende Modifizierungen des Sollwerts für die axiale Rotorposition um jeweils kleine Beträge, bis der Energie- bzw. Leistungsbedarf sein Minimum erreicht hat, erfolgen.

Denn der Zweck des übergeordneten Reglers 33 besteht darin, den Sollwert der Rotorposition entlang des durch die Elektromagnete stabilisierten Freiheitsgrades, also vorliegend in axialer Richtung, beim Auftreten langfristig wirkender äußerer Kräfte so zu variieren, daß der Energieverbrauch der Lageregelung bzw. der magnetischen Lagestabilisierung des Rotors 1 vermindert, vorzugsweise minimalisiert wird.

15

Wie weiter oben im allgemeinen Beschreibungsteil dargelegt worden ist, kann dadurch dieser Energieverbrauch um etwa den Faktor 100 bis 150 vermindert werden.

20

Die allgemeine Verfahrensweise, mit der das geschieht und die in der Anordnung nach der Fig. 1 verwirklicht wird, ist zusammenfassend folgende:

25

(a) Es wird das Vorhandensein äußerer Kräfte detektiert;

(b) der Rotor wird aus seiner stabilisierten Mittenlage in eine neue Stabilisierungslage verlagert; und

30

(c) es wird detektiert, ob die neue Stabilisierungslage einen geringeren Energiebedarf für die magnetische Lagerung des Rotors zur Folge hat; dieser geringere Energiebedarf ergibt sich dann, wenn die neue Stabilisierungslage derart ist, daß die Permanentmagnete, welche außer den Elektromagneten zur magnetischen Rotorlagerung vorgesehen sind, eine Gegenkraft zu der detektierten äußeren

35

- (d) die Stabilisierungslage des Rotors wird solange verändert, bis sich ein verminderter, vorzugsweise minimalisierter, Energiebedarf der Rotorlagerung ergibt.
- 5 In dem obigen Verfahrensschritt(b) kann der Rotor, anstatt daß er im ersten Schritt mit begrenzter Schrittweite willkürlich in irgendeiner Richtung aus seiner stabilisierten Mittenlage verschoben wird, auch gleich im ersten Schritt im Sinne einer Verminderung des Energiebedarfs verschoben werden, sofern nicht nur das
10. Vorhandensein der äußeren Kraft sondern auch deren Richtung (positiv oder negativ) in Richtung des Freiheitsgrades, welcher durch die Elektromagnete stabilisiert wird, durch die Detektionseinrichtung festgestellt wird. Wenn die Detektionseinrichtung darüberhinaus auch die Größe der in
- 15 Richtung des erwähnten Freiheitsgrades auftretenden äußeren Kraft ermittelt, kann eine schrittweise Änderung der Stabilisierungsposition des Rotors entfallen, und der Rotor kann programmiert entsprechend der Richtung und Größe der Kraftkomponente, die entlang des stabilisierten
- 20 Freiheitsgrades wirkt, in einem Schritt in seine neue Stabilisierungsposition verschoben werden, die einem minimalen Energiebedarf der magnetischen Rotorlagerung entspricht.
25. Es sei anhand des oberen Teils der Figur 1 und anhand der Figuren 5 und 6 der Drehantrieb des Rotors 1 näher erläutert:

Dieser Drehantrieb kann an sich in verschiedenster Weise

30 ausgebildet sein, zum Beispiel als Wirbelstromantrieb, insbesondere mittels eines Asynchronmotors, als Synchronmotor, als elektronisch kommutierter Elektromotor o. dgl. Bevorzugt ist als Antrieb des Rotors 1 ein Asynchronmotor vorgesehen, der die ringförmigen Antriebselektromagnete 10a,

35 10b (Fig. 1) oder 10 (Fig. 6) im Stator 5 umfaßt, sowie den

Rotor 1 als Kurzschlußläufer (Fig. 1) oder einen Kurzschlußläuferring 10c (Fig. 6) und die dreiphasig betriebenen Antriebselektromagnete 10a, 10b bzw. den Antriebselektromagnet 10, deren Wicklungen die Funktion von Felderregungsspulen haben. Diese Wicklungen, die in Fig. 1 nicht gezeigt und in Fig. 6 bei 105 angedeutet sind, sind vorzugsweise in Sternschaltung mit einer Phasenverschiebung von $\varphi = 60^\circ$ geschaltet. Die Spannungsverläufe 49b und 49c, welche zu den Wicklungen der Antriebsmagnete 10a 10b oder 10 führen, folgen den in Figur 1 an diesen Zuführungsleitungen angegebenen Ausdrücken, worin A die maximale Spannungsamplitude, f die Frequenz der Wechselspannung und φ die vorher erwähnte Phasenverschiebung der drei Phasen 1, 2 und 3 auf den Zuführungsleitungen 49a, 49b und 49c gegeneinander bedeuten.

Als Betriebsspannungsquelle ist ein Oszillator 50 vorgesehen, an den die Zuführungsleitungen 49 a, 49 b und 49 c über Leitungen 51 a, 51 b und 51 c und je einen in seinem Verstärkungsgrad steuerbaren Leistungsverstärker 52 a, 52 b und 52 c angeschlossen sind, der die vom Oszillator 50 gelieferte Wechselspannung verstärkt. Der Verstärkungsgrad, und damit die Ausgangsamplitude A der am Ausgang der Leistungsverstärker 52 a, 52 b und 52 c erhaltenen Wechselspannung wird mittels einer über die Leitung 53 auf die Verstärkungsgrad-Steuereingänge gegebenen Steuerspannung gesteuert. Auch die Frequenz des Oszillators 50 ist veränderbar und kann über eine entsprechende Steuerspannung eingestellt werden, die auf den Frequenz-Steuereingang 55 des Oszillators 50 gegeben wird. Auf diese Weise sind die Frequenz f und die Ausgangsspannungsamplitude A des Oszillators, die an den Wicklungen der Antriebselektromagneten 10 a und 10 b bzw. 10 wirksam werden, veränderbar.

Diese Veränderung der Frequenz und der Ausgangsspannungs-
amplitude erfolgt in vorbestimmter bzw. programmierter
Weise mittels eines ersten Charakteristikspeichers 56,
dessen Ausgang an den Frequenz-Steuereingang 55 des
5 Oszilators 50 angekoppelt ist, sowie mittels eines
zweiten Charakteristikspeichers 57, dessen Ausgang an
die Verstärkungsgrad-Steuereingänge 54 a, 54 b und
54 c der Leistungsverstärker angekoppelt ist. Der Ein-
gang des zweiten Charakteristikspeichers 57 ist über
10 einen Frequenz-zu-Spannung-Umsetzer 58 mit einem Aus-
gang des Oszilators 50 verbunden. Auf diese Weise wird
die Amplitude A in Abhängigkeit von der jeweiligen
Betriebsfrequenz f, die der Oszillator 50 erzeugt nach
einer vorbestimmten Charakteristik, die symbolisch auf
15 dem Charakteristikspeicher 57 angedeutet ist, verändert.

Zur Steuerung der Frequenz f des Oszillators 50 für den
ersten Charakteristikspeicher 56 wird auf den Eingang
20 59 des letzteren ein Steuersignal gegeben, das an sich
auf verschiedenste Weise erzeugt werden kann. Im vor-
liegenden Falle der Steuerung bzw. Regelung des Antriebs
einer Blutpumpe, nämlich der Zentrifugalblutpumpe 2,
wird dieses Steuersignal von dem Drucksensor 12 erzeugt
25 und über eine Leitung 60 zugeführt. Dieser Drucksensor
liefert als Steuersignal eine den Druck auf der venösen
Seite oder der Saugseite der Blutpumpe representierende
Ausgangsspannung. Durch den ersten Charakteristik-
speicher 56 wird diese Ausgangsspannung gemäß einer
30 Frank-Starling-Charakteristik in eine entsprechend
Steuerspannung für den Oszillator 50 derart umgewandelt,
daß die Pumpcharakteristik der als künstliches Herz
dienenden Zentrifugalblutpumpe 2 den physiologischen
Bedingungen entspricht, wie sie von Frank und Starling
35 angegeben worden sind. Hierzu ordnet der Charakteristik-
speicher 56 einem vorbestimmten Steuersignal an seinem

Eingang 59 eindeutig eine bestimmte Steuerspannung 55 an seinem Ausgang zu, die er, wie erwähnt, auf den Frequenz-Steuereingang des Oszillators 50 gibt.

5 Der zweite Charakteristikspeicher 57 hat eine solche Charakteristik, daß die auf den Zuführungsleitungen 49a, 49b und 49c erhaltenen Betriebsspannungen in ihrer Frequenz f und ihrer Ausgangsspannungsamplitude A last- und drehzahlabhängig derart verändert werden, daß das vom
10 Asynchronmotor abgegebene Drehmoment, d.h. also vorliegend das am Rotor 1 erzeugte Drehmoment, bei der jeweiligen Drehzahl des Asynchronmotors also vorliegend des Rotors 1, mit dem Lastmoment korreliert.

15 In einer besonders günstigen und bevorzugten Ausführungsform, die nun anhand der kurzen Darstellung der Figur 5 erläutert sei, ist es so, daß das jeweilige Lastmoment des Rotors auf der Motorkennlinie I bzw. II des Asynchronmotors knapp unterhalb des Kippmoments und oberhalb der
20 Kippdrehzahl liegt. In Figur 5 sind zwei ausgewählte Motorkennlinien I und II dargestellt, die jeweils für eine Ausgangsspannungsamplitude A_1 bzw. A_2 und eine zugeordnete Frequenz f_1 bzw. f_2 gelten, und zwar gibt in üblicher Weise die Motorkennlinie den Verlauf des
25 Drehmoments M in Abhängigkeit von der Drehzahl N (z.B. in Umdrehungen pro Minute) des Asynchronmotors wieder.

Die Punkte P_1 und P_2 der erhaltenen Betriebskennlinie B des Motors liegen entsprechend der obigen Definition
30 dieser gewählten Betriebslinie jeweils wenig unterhalb des Kippmoments M_1 bzw. M_2 und oberhalb der Kippdrehzahl N_1 bzw. N_2 der für die zugehörige Ausgangsspannungsamplitude A_1 bzw. A_2 und für die zugehörige Frequenz f_1 bzw. f_2 gültigen Motorkennlinie I bzw. II. Das gilt für
35 alle anderen Punkte der Betriebskennlinie B des Asynchron-

Auf diese Weise wird erreicht, daß der Rotor 1 der Zentrifugalblutpumpe 2 mit minimalem Energieaufwand angetrieben wird und gleichzeitig die tatsächliche Blutpumpenleistung der Frank-Starling-Charakteristik entspricht, also optimal den physiologischen Bedingungen des menschlichen Blutkreislaufs angepaßt ist. Die zu diesem Zweck vorgesehenen Charakteristikspeicher 56 und 57 können unter Beachtung der Tatsache, daß die jeweilige Charakteristik nichtlinear ist, beispielsweise je eine Widerstandsnetzmatrix oder ein elektronischer Speicher sein.

Die erfindungsgemäße magnetische Rotorlagerung hat insbesondere, jedoch nicht ausschließlich, die folgenden Vorteile:

(a) Sie kommt mit dem geringsten Energiebedarf aus.

(b) Sie bleibt insbesondere dort, wo sie in sich bewegenden Teilen, Einrichtungen o. dgl. wie z. B. Raketen, vorgesehen ist, trotz der Bewegung der jeweiligen Einrichtung, insbesondere deren Beschleunigung oder Verzögerung, funktionstüchtig, so daß sie ohne Beschränkung in allen Fällen anwendbar ist, in denen der Stator als solcher eine Bewegung erfährt.

(c) Sie ist insbesondere wegen der vorstehend unter (a) und (b) angegebenen Vorteile auch überall dort anwendbar, wo sie mit einem einmaligen, während des Betriebs nicht ergänzbaren Energievorrat auskommen muß, also im sogenannten Inselbetrieb.

FIG. 4a

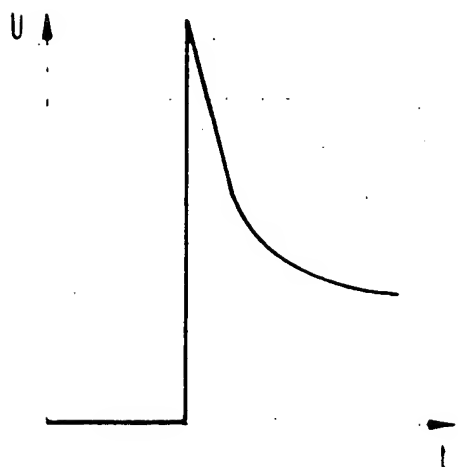
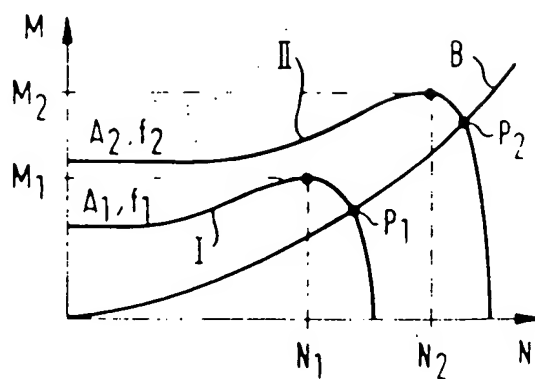


FIG. 4b



FIG. 5



3343186

- 59 -

FIG. 6

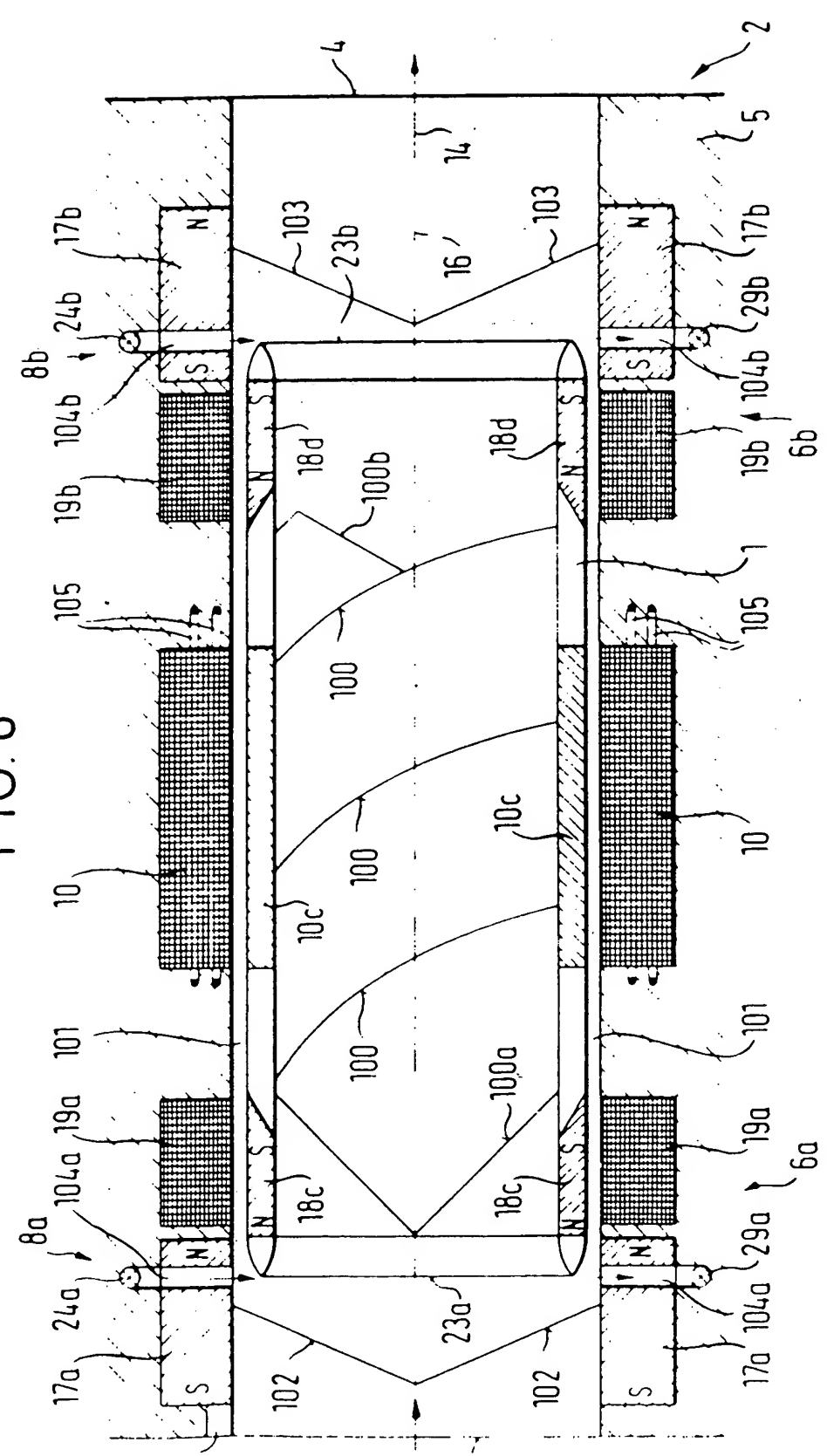


FIG. 1

